

УДК 523.947

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ ПОЛЯРНОЙ КОРОНАЛЬНОЙ ДЫРЫ НА СОЛНЦЕ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

© 2021 г. О. А. Голубчина^{1, *}

¹Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: golubchina_olga@mail.ru

Поступила в редакцию 20.10.2020 г.

После доработки 19.12.2020 г.

Принята к публикации 30.12.2020 г.

Представлен обзор основных результатов исследования полярной корональной дыры (КД) над Северным полюсом Солнца на основе наблюдений солнечного затмения 29 марта 2006 г. с помощью радиотелескопа РАТАН-600 в широком диапазоне сантиметровых длин волн: 1.03, 1.38, 2.7, 6.2, 13.0, 30.7 см – с привлечением наблюдательных и теоретических данных работ о свойствах корональных дыр на Солнце, опубликованных различными авторами. Обсуждаются полученные результаты: распределение яркостных температур полярной корональной дыры над Северным полюсом Солнца на расстояниях 1.005–2.0 радиуса оптического диска Солнца от центра солнечного диска; усиление микроволнового излучения полярной корональной дыры, зарегистрированное на коротких длинах волн; идентичность температурных свойств полярной КД и низкоширотных корональных дыр на Солнце в период минимальной солнечной активности. Сравнение полученных яркостных температур полярной корональной дыры с яркостными температурами крупных низкоширотных корональных дыр, наблюдавшихся ранее (1973–1976, 1984–1987 гг.) на близких длинах волн, свидетельствует об идентичности температурных свойств корональных дыр независимо от их расположения на Солнце и организации корональных дыр в период минимума солнечной активности.

DOI: 10.31857/S0004629921050030

1. ВВЕДЕНИЕ

Корональные дыры (КД) – это области низкой температуры и плотности солнечной атмосферы. Они имеют однополярное магнитное поле с открытой конфигурацией. Во время увеличения солнечной активности КД может существовать на любой широте Солнца. В момент минимальной солнечной активности преобладает дипольная составляющая солнечного магнитного поля вращательного направления. В этот период полярные КД всегда видны на полюсах Солнца.

В радиочастотном диапазоне особенно активные исследования КД начались в 1973–1975 гг. [1–5]. С развитием космической астрономии исследования корональных дыр на Солнце продолжились более интенсивно [6–11]. Данные наблюдения в ультрафиолете (EUV) и в мягком рентгеновском излучении (3–60 Å) способствовали объяснению многих очень важных свойств корональных дыр [12–14].

КД наблюдаются на фоне спокойного Солнца как области пониженной интенсивности на сантиметровых длинах волн при $\lambda > 5–6$ см [15]. На этих длинах волн радиоизлучение КД коррелиру-

ет с самыми темными местами на поверхности Солнца в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах и с областями яркости в линии He I 1038 Å. КД не видны на поверхности Солнца на коротких сантиметровых длинах волн. 29 марта 2006 г. появилась уникальная возможность впервые исследовать свойства полярной корональной дыры над северным полюсом Солнца с помощью РАТАН-600 в широком сантиметровом диапазоне длин волн.

2. ОБСТОЯТЕЛЬСТВА НАБЛЮДЕНИЙ МАКСИМАЛЬНОЙ ФАЗЫ СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 29 МАРТА 2006 г. НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РАТАН-600

Как правило, радиоастрономы наблюдают солнечные затмения с помощью небольших параболических антенн диаметром 1–3 м, которые легко доставляются к месту солнечных затмений. В этом случае центр диаграммы направленности антенны обычно направлен в заданные точки слежения на Солнце. Радиотелескоп непрерывно отслеживает выбранные точки на Солнце. За счет движения Луны относительно Солнца, а также за

Таблица 1. Угловые размеры горизонтальной (ρ_h) и вертикальной (ρ_v) диаграммы направленности антенны РАТАН-600 на длинах волн наблюдений

λ , см	1.03	1.38	2.7	6.2	13	30.7
$(\rho_h \times \rho_v)$, '	0.4×17.3	0.6×19.3	1.2×19.4	2.6×25.0	5.7×35.8	13.4×84.4

счет разницы скоростей между Луной и Солнцем достигается значительное увеличение пространственного разрешения антенны. Это позволяет астрономам исследовать мелкие детали на Солнце. Этот метод всегда применялся при наблюдениях солнечных затмений.

Так, при наблюдении полного солнечного затмения 30 июня 1973 г. в качестве приемной антенны для радиоизлучения на длине волны 3.3 мм использовался параболаид диаметром 3 фута (~0.91 м). Угловое разрешение антенны на этой волне равнялось 14'. С помощью вышеуказанного метода наблюдения было обнаружено лимбовое уярчение, равное ~20% на волне 3.3 мм [3]. Аналогичный метод был использован при наблюдении полного солнечного затмения 11 июля 1991 г. в субмиллиметровом диапазоне [16]. Согласно результатам этого наблюдения также было обнаружено уярчение над солнечным лимбом.

В отличие от параболических антенн радиотелескоп РАТАН-600 не имеет функции непрерывного слежения за наблюдаемым источником. Это транзитный телескоп-антенна переменного профиля (АПП). Радиотелескоп предварительно позиционируется к заданной точке на небесной сфере для наблюдения источника и остается неподвижным, пока наблюдаемый небесный объект проходит через диаграмму направленности антенны (ДНА) радиотелескопа. Поэтому пространственное разрешение радиотелескопа не меняется в течение всего времени прохождения Солнца и Луны через ДНА. Радиотелескоп РАТАН-600 имеет ножевую ДНА. Простран-

ственное разрешение ($\rho_h \times \rho_v$) радиотелескопа РАТАН-600 для различных длин волн приведено в табл. 1. Время прохождения Солнца и Луны через главный лепесток ДНА равно 2.5 мин, а с учетом прохождения через боковые лепестки ДНА — 5 мин. Основной задачей наших наблюдений было определение температурных характеристик полярной корональной дыры в сантиметровом диапазоне длин волн на расстояниях примерно 1–2 R_s от центра оптического диска Солнца (R_s — радиус оптического диска Солнца).

Наблюдение затмения 29 марта 2006 г. на РАТАН-600 проводилось одновременно двумя методами: в стандартном режиме наблюдений на Южном секторе с перископом [17] и в режиме “Эстафеты” [18]. В данной работе приводится анализ результатов наблюдений максимальной фазы солнечного затмения 29 марта 2006 г. в режиме “Эстафеты” на Северо-Восточном секторе радиотелескопа РАТАН-600 на длинах волн 1.03, 1.38, 2.7, 6.2, 13.0, 30.7 см (рис. 1).

В момент максимальной фазы солнечного затмения (11:17 UT) открытая часть оптического диска Солнца составляла 0.2%. Азимут ориентации вторичного отражателя при наблюдении методом “Эстафеты” равен 240°. Центр диаграммы направленности антенны был смещен на +15' к северу от центра оптического диска Солнца. Таким образом, центральная часть ДНА располагалась в северной полярной зоне, где находилась полярная корональная дыра. Это позволило с помощью РАТАН-600 наблюдать полярную корональную дыру над Северным полюсом Солнца и получить распределение яркостной температуры и некоторые физические характеристики полярной корональной дыры на Солнце в период минимальной солнечной активности.

3. МЕТОД ОБРАБОТКИ НАБЛЮДЕНИЙ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Основная задача наблюдений — определение распределения яркостных температур полярной корональной дыры на Солнце в сантиметровом диапазоне длин волн на расстояниях примерно 1–2 R_s — выполнялась путем сравнения реальных наблюдений и полуэмпирических моделей Солнца и Луны. При наблюдении максимальной фазы солнечного затмения мы визуальным образом получаем кривую изменения антенной температуры принимаемого сигнала от Солнца и Луны со време-

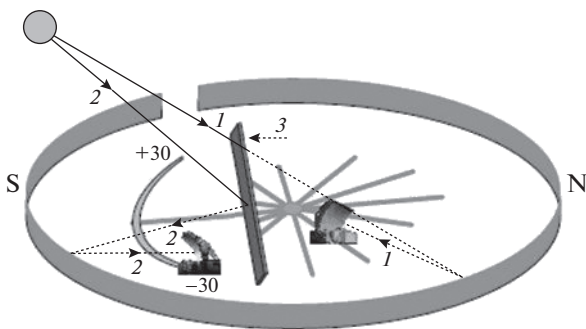


Рис. 1. Путь луча от Солнца к вторичному отражателю во время наблюдения солнечного затмения 29 марта 2006 г. на Северо-Восточном секторе РАТАН-600 методом “Эстафета” (1) и в стандартном режиме наблюдений на Южном секторе (2) с перископом (3).

нем их прохождения через диаграмму направленности антенны. Оценкой качества моделирования является степень совпадения антенных температур модельных источников с реальной записью радиоизлучения Солнца и Луны во время солнечного затмения 29 марта 2006 г.

На первом этапе моделирования диаграмма направленности антенны представляется бесконечно узким ножом, т.е. горизонтальный размер ДНА не учитывается. В этом случае уравнение сглаживания антенны связывает измеренную температуру антенны $T_a(\varphi_0)$ наблюдаемого источника с его яркостной температурой $T_b(\varphi)$:

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

Здесь $A(\varphi - \varphi_0)$ – нормализованная вертикальная диаграмма направленности антенны, $(\varphi - \varphi_0)$ – угол отклонения от центра вертикальной ДНА, $T_b(\varphi)$ – распределение яркостной температуры по источнику, $T_a(\varphi_0)$ – антенная температура наблюдаемого источника. Необходимо найти такие значения яркостных температур, которые при их подстановке в уравнение (1) давали бы значения антенных температур, максимально близкие к наблюдаемым. Прежде всего, необходимо определить яркостные температуры радиоизлучения Солнца и Луны на каждый момент времени наблюдения.

Координаты оптического центра Солнца (Луны) вычислялись на каждую секунду времени наблюдения (всего 300 временных моментов, так как время прохождения Солнца и Луны через ДНА с учетом прохождения через боковые лепестки ДНА равно 5 мин).

Перечисленные задачи были выполнены путем создания полуэмпирических моделей Солнца (Луны). Для моделирования был введен ряд упрощений. Математическая модель Солнца (Луны) рассматривалась как сферически симметричная модель, состоящая из концентрических колец с равномерным распределением яркости внутри них.

Яркостные температуры модельных колец Солнца (Луны) задавались согласно литературным данным [19], либо подгоняя их методом проб и ошибок, либо решая уравнение переноса [19, 20], либо комбинируя все перечисленные методы. Яркостные температуры лунных колец устанавливались по опубликованным литературным данным [19], но на коротких длинах волн 1.03, 1.38, 2.7 см яркостные температуры Луны задавались методом проб и ошибок. Кроме того, яркостные температуры солнечных колец были рассчитаны путем решения уравнения переноса с использованием уравнения Баумбаха-Аллена для определения концентрации электронов на заданных расстояниях в солнечной короне [21]. При этом средняя электронная температура солнечного излучения на длинах волн 1.03 см, 1.38 см была

принята равной $T_e = 10^5$ К согласно измерениям электронной температуры вблизи лимба Солнца, выполненным во время затмения Солнца 29.03.2006 г. в Ливии (Imaging Spectrograph of Coronal Electrons, ISCORE [22]). Средняя электронная температура солнечной короны на $\lambda > 1.38$ см принималась равной $T_e = 1.4 \times 10^6$ К.

В обоих методах задания яркостной температуры колец Солнца (Луны) вклад Солнца (Луны) в наблюдаемый поток радиоизлучения рассчитывался на каждый момент времени наблюдения с учетом вертикальной (ρ_v) ДНА РАТАН-600 [21]. Дальнейшее сравнение модельных и зарегистрированных кривых записей затмений показало, что на расстояниях от лимба Солнца до $1.4-1.6 R_s$ яркостные температуры модельных колец Солнца следует устанавливать, используя метод проб и ошибок, а расчетный метод определения яркостных температур следует использовать, начиная с расстояний $1.5-1.6 R_s$ от центра диска Солнца. Таким образом, для каждой длины волны были сформированы одномерные массивы радиусов Солнца и Луны и соответствующих яркостных температур. Распределение яркостных температур с расстоянием от солнечного лимба до $2 R_s$ на рассматриваемых длинах волн наблюдения представлено на рис. 2(а,б,в).

Решение уравнения антенного сглаживания (1) позволяет определить антенные температуры наблюдаемого источника согласно яркостным температурам его модели. Решение уравнения (1) подробно представлено в работе [21]. При наблюдении в режиме “Эстафета” используется усеченная часть отражающей поверхности радиотелескопа, поэтому при обработке наблюдений необходимо учитывать переизлучение антенны, а именно, модельный сигнал следует умножить на коэффициент m . В этом случае $m = 6.4-6.6$. Необходимо учесть сглаживание радиоизлучения источника горизонтальной ДНА. Горизонтальная диаграмма направленности радиотелескопа описывается функцией $(\sin u)/u$, где $u = \pi D \sin \varphi / \lambda$. Здесь D – горизонтальная апертура антенны, λ – длина волны, $\sin \varphi = p\lambda/D$, p – число лепестков диаграммы направленности антенны. Сглаживание исходного сигнала моделирования выполняется функцией $F(\varphi) = [(\sin u)/u]^2$.

Яркостные температуры Солнца от ближайшей точки лимба до $2 R_s$ были заданы так, чтобы рассчитанные далее антенные температуры обеспечивали максимальную степень их совпадения с реальной записью радиоизлучения. Хорошее согласие достигнуто между модельным сигналом радиоизлучения и реальной радиозаписью после выполнения всех процедур обработки данных, рассмотренных выше (рис. 3). В правой части реальной записи наблюдения солнечного затмения

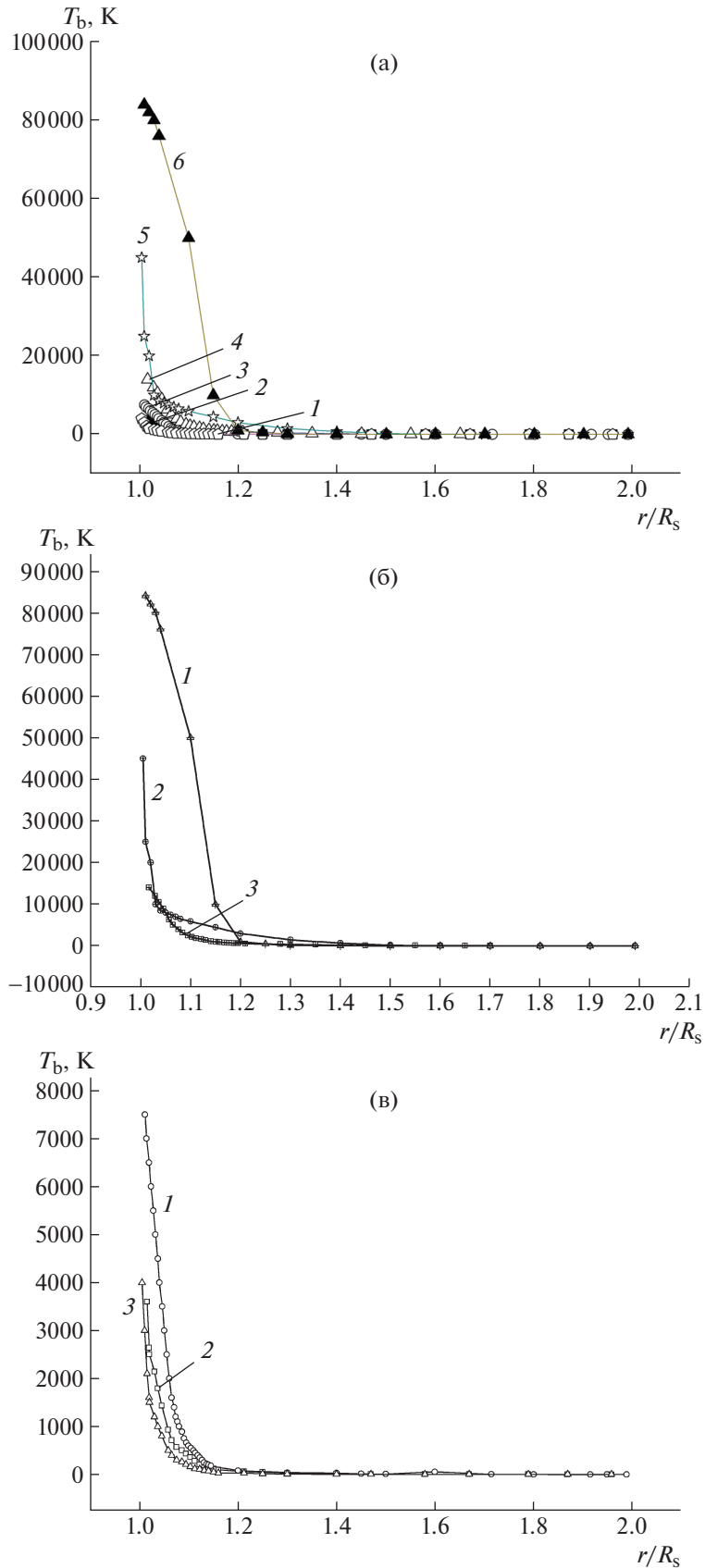


Рис. 2. Распределение яркостных температур (T_b , K) по расстоянию (r/R_s) от солнечного лимба до $2 R_s$ для КД над Северным полюсом Солнца на длинах волн а) 1 – 1.03 см, 2 – 1.38 см, 3 – 2.7 см, 4 – 6.2 см, 5 – 13.0 см, 6 – 30.7 см; б) 1 – 30.7 см, 2 – 13.0 см, 3 – 6.2 см; в) 1 – 2.7 см, 2 – 1.38 см, 3 – 1.03 см.

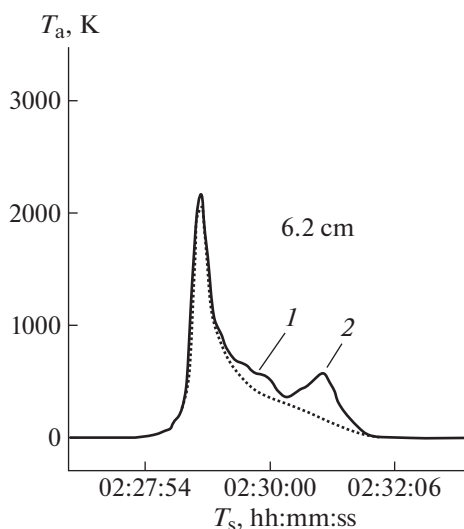


Рис. 3. Приведенная модель (пунктирная линия) и реальная запись (сплошная линия) радиоизлучения Солнца и Луны после выполнения всех процедур обработки данных на $\lambda = 6.2$ см (1 – протуберанцы; 2 – восходящий локальный источник № 10866 к востоку от центра Солнца, T_a – антенная температура, T_s – звездное время).

на $\lambda = 6.2$ см (сплошная линия) отчетливо виден локальный источник – 1 (рис. 3). Этот локальный источник был идентифицирован с высокоширотным солнечным протуберанцем. Радиоизлучение этого локального источника хорошо видно на длинах волн 1.03, 1.38, 2.7, 6.2, 13.0 см. Положение максимума радиоизлучения совпадает с положением солнечного протуберанца на изображении Солнца в линии He II 304 Å (SOHO, $\varphi = 45^\circ$, NE лимб Солнца) (рис. 4). Физические характеристики этого локального источника были исследованы и приведены в работе [23].

Локальный источник 2 на рис. 3 был идентифицирован с группой восходящих солнечных пятен № 10866 согласно данным www.SolarMonitor.org (рис. 4). Этот восходящий локальный источник виден в радиоизлучении наших наблюдений на длинах волн 2.7, 6.2, 13.0, 30.7 см. Наблюдение на РАТАН-600 было проведено в 11:17 UT. Ближайшее изображение Солнца (SXI) было дано SolarMonitor на момент 12:58 UT.

Впервые обнаружено распределение яркостных температур в полярной области Солнца в сантиметровом диапазоне длин волн на расстояниях ~ 1.005 – $2.0 R_s$. Резкое снижение яркостной температуры радиоизлучения Солнца на длинах волн $\lambda = 13.0, 30.7$ см наблюдается на интервале расстояний 1.005 – $1.03 R_s, 1.01$ – $1.15 R_s$ (рис. 2а, б) [24]. Резкое снижение яркостной температуры вблизи солнечного лимба указывает, что полярная КД уверенно регистрируется на $\lambda = 13.0,$

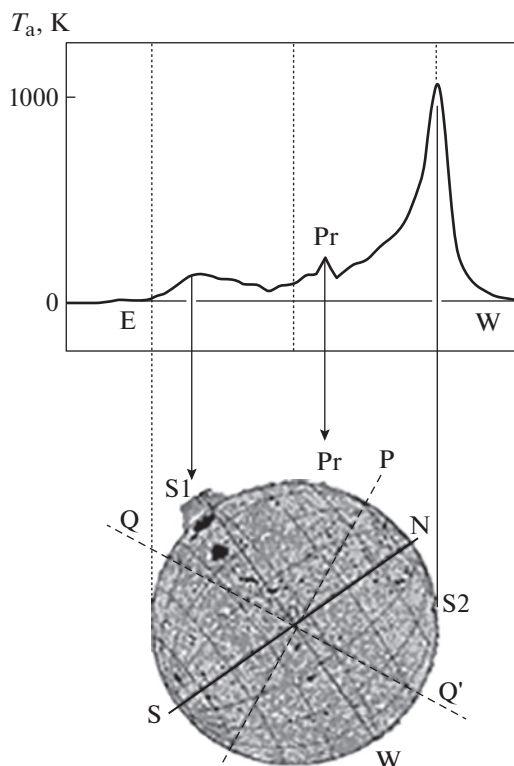


Рис. 4. Запись наблюдения солнечного затмения на волне 2.7 см в канале интенсивности на Северо-Восточном секторе РАТАН-600 и изображение Солнца (He II 304 Å, SOHO). Средняя стрелка указывает на положение протуберанца (Pr). Широта этого источника $\varphi = 45^\circ$. S1 – положение восходящего локального источника № 10866; S2 – положение входа Солнца и Луны в ножевую ДНА радиотелескопа во время солнечного затмения. Проекция небесных осей на диск Солнца: (E–W), (S–N) – направление Восток–Запад, Юг–Север Солнца; (Q–Q') – проекция небесного экватора; OP – направление на Северный полюс Мира.

30.7 см. Резкого уменьшения яркостных температур радиоизлучения Солнца на коротких длинах волн (1.03, 1.38, 2.7 см) на расстояниях от $1.005 R_s$ до $1.03 R_s$ не выявлено (рис. 2а, в).

Сравнение яркостных температур полярной КД и спокойного Солнца в сантиметровом диапазоне длин волн проводилось с привлечением результатов измерений яркостных температур спокойного Солнца и крупных низкоширотных корональных дыр, полученных в стандартном режиме наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600 в годы спокойного Солнца [7]. Яркостные температуры (T_b, K) полярной корональной области над Северным полюсом Солнца на $\lambda = 13.0$ см ниже, чем (T_b, K), полученные в соответствии с наблюдениями спокойного Солнца на близкой длине волн $\lambda = 11.7$ см (рис. 5). Последнее также подтверждает существование полярной КД над Северным полюсом Солнца 29 марта 2006 г. По-

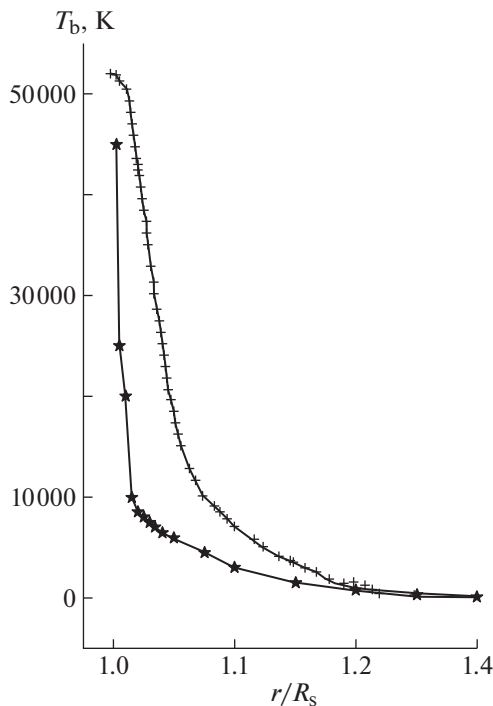


Рис. 5. Распределение яркостной температуры в солнечной короне на интервале расстояний $1 - 1.4 r/R_s$. Здесь знаками “звездочка” обозначены значения яркостных температур (T_b , K) полярной корональной дыры, которые были обнаружены при наблюдении солнечного затмения 29.03.2006 г. на $\lambda = 13$ см; знаками “плюс” обозначены значения (T_b , K), взятые из работы [7] для спокойного Солнца на близкой длине волны 11.7 см.

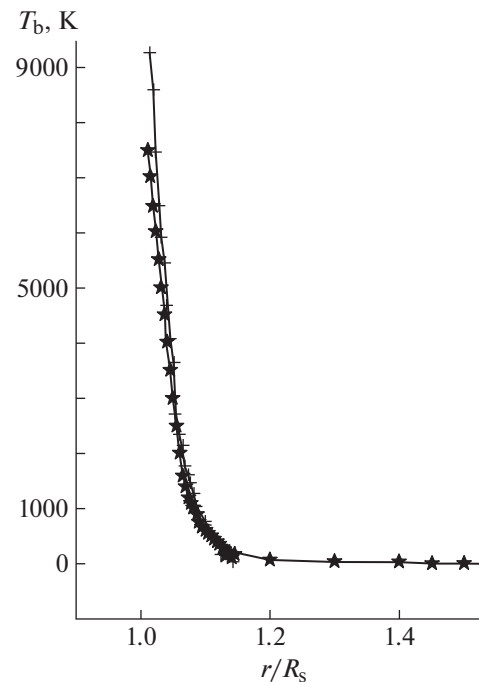


Рис. 6. Распределение яркостной температуры Солнца, полученной во время солнечного затмения 29 марта 2006 г. (“звездочки”), и яркостной температуры спокойного Солнца (“плюсы”) на $\lambda = 2.7$ см [7].

этому по результатам наблюдения солнечного затмения 29 марта 2006 г. были определены характеристики яркостных температур именно полярной корональной дыры. Сравнение распределения яркостной температуры полярной корональной дыры с распределением яркостной температуры спокойного Солнца на длине волны 2.7 см показало их совпадение (рис. 6). Это также подтвердило вывод о том, что полярная КД на $\lambda = 2.7$ см не видна [7, 24].

4. ИДЕНТИЧНОСТЬ ТЕМПЕРАТУРНЫХ СВОЙСТВ НИЗКОШИРОТНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР И ПОЛЯРНОЙ КД НА СОЛНЦЕ

Во время минимальной солнечной активности на Солнце преобладает вращающаяся дипольная составляющая магнитного поля. Полярные области на Солнце в это время имеют однополярное магнитное поле с открытой конфигурацией, и поэтому полярные корональные дыры всегда существуют на Солнце в период минимальной солнечной активности. Низкоширотные корональные

дыры Солнца также являются областями открытого магнитного поля. Они могут быть организованы либо случайными конвективными движениями в фотосфере, либо пересоединениями линий открытого магнитного поля с линиями замкнутого магнитного поля. Эта идея о возможной организации КД была представлена в работах [25, 26].

Существует ли зависимость яркостных температур КД от их расположения на Солнце и, следовательно, от организации КД? Для ответа на этот вопрос было проведено сравнение яркостных температур полярной КД с температурными характеристиками спокойного Солнца и низкоширотных КД на фоне спокойного Солнца по данным более ранних регулярных наблюдений. Эти наблюдения были выполнены с помощью радиотелескопов РАТАН-600 и БПР (Большой Пулковский радиотелескоп) в период минимума солнечной активности (1973–1976, 1984–1987 гг.) в сантиметровом диапазоне. Были получены распределения яркостных температур спокойного Солнца на расстояниях от солнечного лимба до $1.4 R_s$ от центра Солнца [7]. Эти исследования показали, что низкоширотные КД на фоне спокойного Солнца не видны на коротких сантиметровых длинах волн. Этот результат совпадает с результатом наших исследований полярной КД. Полярная корональная дыра 29.03.2006 г., о кото-

Таблица 2. Яркостные температуры (T_b , К) спокойного Солнца (S1), средние полуэмпирически согласованные модельные данные низкоширотной корональной дыры (СН1) на фоне спокойного Солнца и полярной корональной дыры (СН2) на близких длинах волн

	$\lambda^{(1)}$ (см)	6	15	31.6		$\lambda^{(2)}$ (см)	6.2	13	30.7
СН (1)	T_b , 10^3 К	19.6	39	86	СН (2)	T_b , 10^3 К	14	45	84
S (1)	T_b , 10^3 К	24.7	63	174		r/R_s	1.017	1.005	1.01

Здесь $\lambda^{(1)}$ – данные работы [15]; $\lambda^{(2)}$ – результаты наблюдения солнечного затмения 29 марта 2006 г. на РАТАН-600, r/R_s – расстояние от центра солнечного диска точек измерения, ближайших к солнечному лимбу во время солнечного затмения.

рой идет речь, а также низкоширотные КД на фоне спокойного Солнца на коротких длинах волн сантиметрового диапазона в периоды минимальной солнечной активности не видны.

Яркостные температуры КД на фоне спокойного Солнца и КД полярной области Солнца на сантиметровых длинах волн $\lambda > 5$ см ниже, чем (T_b , К), полученные согласно наблюдениям спокойного Солнца. Наконец, это сравнение указало на близкое совпадение (T_b , К) низкоширотных КД и полярной КД в точках распределений температур ближайших к солнечному лимбу на близких длинах волн (табл. 2).

Как было замечено выше, резкое уменьшение (T_b , К) радиоизлучения солнечной полярной области на коротких интервалах расстояний (1.005–1.03 R_s) вблизи солнечного лимба указало на существование полярной КД на $\lambda = 13$ см. Наблюдения больших низкоширотных КД на радиотелескопах БПР и РАТАН-600 показали подобные результаты, а именно такие КД были видны на $\lambda \geq 5$ см.

Результаты сравнений яркостных температур низкоширотных КД, полярной КД и спокойного Солнца (табл. 2) свидетельствуют об идентичности температурных свойств КД независимо от их расположения на Солнце и организации корональных дыр в период минимальной солнечной активности [27].

5. ДИСКУССИЯ

Результаты наблюдений сантиметрового радиоизлучения полярной корональной дыры во время солнечного затмения 29 марта 2006 г. на радиотелескопе РАТАН-600 и анализ сравнения этих результатов с радиоизлучением спокойного Солнца, низкоширотных корональных дыр показали резкое снижение яркостной температуры радиоизлучения в корональных дырах на длинах волн, больших 4–5 см.

На коротких радиоволнах наблюдений ($\lambda = 1.03, 1.38, 2.7$ см) резкого снижения яркостной температуры в КД не обнаружено. Радиоизлучение в области этих длин волн в основном исходит из верхней хромосферы. На волне ~ 1 см яркостная температура спокойного Солнца $T_b \sim 10^4$ К.

Полученная яркостная температура в полярной корональной дыре на волне 1.03 см на расстоянии 1.005 R_s от центра Солнца (~ 3500 км от лимба Солнца) равна $T_b = 4000$ К. Чем можно объяснить тот факт, что КД на коротких длинах волн сантиметрового диапазона не видна? Этот вопрос исследовался во многих работах при последовательном анализе возможных причин этого явления. Некоторые из этих работ мы попытаемся коротко напомнить и обсудить. Результаты многочисленных наблюдений в миллиметровом диапазоне длин волн указывают на усиление радиоизлучения в полярных корональных дырах [3–5, 8–11, 28–30].

Впервые уярчение (температуры 2000 К и 1500 К) полярной КД было зарегистрировано на миллиметровых длинах волн (13.5 мм и 8 мм) в 1974 г. с помощью Крымского 22-метрового радиотелескопа [4].

Согласно данным результатов наблюдений солнечного затмения 30 июня 1973 г., на волне 3.3 мм было обнаружено лимбовое уярчение $\sim 20\%$ для 0.5 угла лимба, но полное лимбовое повышение потока было меньше 2% потока моделируемого равномерного солнечного диска. Так как наблюдаемое уярчение лимба меньше, чем моделируемое для сферически симметричной солнечной атмосферы, авторы пришли к выводу, что на лимбе существуют неоднородные особенности, радиоизлучение которых усредняется ДНА [3].

Лимбовое уярчение солнечного излучения, а также усиление излучения полярных областей исследовалось с помощью наблюдений Солнца в оптическом диапазоне, ультрафиолете, рентгеновском излучении и в микроволновом радиодиапазоне нередко при одновременном сопоставлении результатов наблюдений с разработанными моделями солнечной атмосферы [16, 28, 29, 32].

Субмиллиметровые ($\lambda = 850$ мкм) наблюдения полного солнечного затмения 11 июля 1991 г. также обнаружили уярчение 10–35% над солнечным диском [16]. Сравнение результатов этих наблюдений с наблюдениями в НЧ свидетельствовало о существовании значительно сглаженного холодного компонента в верхней хромосфере.

В исследовании причины усиления интенсивности радиоизлучения полярной корональной

дыры на коротких длинах волн активно использовались наблюдения солнечного радиоизлучения на $\lambda = 1.76$ см, полученные на радиогелиографе Nobeyama radio heliograph (NoRH) и данные ультрафиолетового излучения с коронографов на спутниках.

В статьях [8, 9] Gopalswamy и др. опубликовали исследование наблюдения корональных дыр на $\lambda = 1.76$ см, в оптическом и EUV диапазонах. Они пришли к выводу, что увеличение радиояркости в КД экваториальной области состоит из диффузной составляющей и ярких точек подобно увеличению яркости диффузной составляющей и полярных плюмов в полярных корональных дырах.

Результаты наблюдений на 45-метровом радиотелескопе Нобейма на длинах волн 8.3 мм и 3.1 мм (1984 г.) показали уярчение 3–7% на $\lambda = 8.3$ мм вблизи полюсов на широтах $> 65^\circ$. Впервые на связь между усилением униполярного магнитного поля внутри корональных дыр и усилением радиосигнала на миллиметровых длинах волн было обращено внимание в этой работе [31].

Более подробное исследование корональной дыры было выполнено с использованием микроволновых изображений ($\lambda = 1.76$ см), полученных на радиогелиографе Нобейма, магнитограмм и изображений EUV (SOHO) [9]. Gopalswamy и др. пришли к выводу, что радиоусиление обусловлено “усиленными однополярными магнитными областями, лежащими в основе корональной дыры”; структура микроволнового уярчения состоит из сглаженного компонента и компактного компонента. Точечные источники связаны с взаимодействием элементов разной полярности. Они хорошо видны в корональных линиях EUV и EIT 304 Å, но не видны в микроволновом излучении. Усиление микроволнового излучения ассоциируется с усилением униполярных элементов потока. Самые темные участки корональной дыры в линии EIT 304 Å соответствуют повышенному радиоизлучению. Микроволновое повышение, наиболее вероятно, связано с повышением температуры в хромосфере. В работе [32] использованы наблюдения спокойного Солнца в EUV диапазоне длин волн 40–140 нм (Harvard Skylab EUV) для создания моделей (A–F) различных наблюдаемых компонентов яркости. Исследования показали, что структура хромосферы неоднородна.

Результаты исследований наблюдений на $\lambda = 1.7$ см на радиогелиографе Нобейма (NoRH) также представлены в работе [28]. Было получено, что усиленное радиоизлучение на $\lambda = 1.76$ см неоднородно с яркими пятнами вблизи лимба. Уярчение вблизи лимба на полюсах в период минимума солнечной активности $\sim 25\%$, вблизи экватора $\sim 15\%$, в промежуточных областях $\sim 10\%$. Кроме того, получено, что уярчение на полюсах

на $\lambda = 1.76$ см связано с факелами. В следующей статье Selhorst и др. рассмотрели несколько модификаций атмосферной модели SSC [29], чтобы понять усиление радиоизлучения вблизи полюсов на $\lambda = 1.76$ см. Были рассмотрены различные модели с введением спикул, расположенных случайным образом, а также с введением спикул и небольших областей без спикул (межспикульные дыры), которые на картах наблюдений на $\lambda = 1.76$ см видны как яркие пятна в районе полюса. Яркостные температуры этих полярных пятен могут быть на 40% выше яркостной температуры спокойного Солнца. Межспикульные дыры расположены над полярными факелами, а яркие полярные пятна, наблюдаемые на $\lambda = 1.76$ см, расположены близко к областям полярных факелов. Эти модели хорошо согласуются с результатами наблюдений полярных уярчений на $\lambda = 1.76$ см.

В работе [33] используются наблюдения радиоизлучения Солнца на $\lambda = 1.76$ см, излучение которого формируется в верхней хромосфере и экстремальные ультрафиолетовые (EUV) линии 304 и 171 Å, излучение которых выходит из переходной области и короны. На основе анализа этих данных Oliveira e Silva и др. выражают полное согласие с выводами работы [9] и приходят к заключению, что усиление радиоизлучения на $\lambda = 1.76$ см обусловлено наличием ярких пятен, тесно связанных с присутствием интенсивных униполярных магнитных областей, лежащих в основе корональных дыр.

Радиогелиограф NoRH активно использовался при исследовании полярных корональных дыр на $\lambda = 1.76$ см, в том числе и когда синтезировали диаграмму радио-бабочки по данным ежедневных наблюдений NoRH более чем за 20 лет [30]. Было установлено, что напряженность полярного магнитного поля (Wilcox Solar Observatory) хорошо коррелирует ($r = 0.86$) с микроволновой яркостью полярных корональных дыр. Поскольку униполярные магнитные поля имеют открытую конфигурацию, то нагретая атмосфера, вытекающая вдоль поля, может обеспечить усиление яркости микроволнового излучения в корональных дырах. Однако в этом случае “необходим непрерывный нагрев в верхней хромосфере или под ней со скоростью, пропорциональной фотосферному магнитному потоку”.

Многочисленные исследования полярных КД были проведены в Финляндии (радиообсерватория Метсахови) с помощью радиотелескопа диаметром 14 м на длинах волн 8, 3.4 и 3.5 мм в сочетании с наблюдениями в ультрафиолетовом диапазоне (EUV SOHO/EIT) и в мягком рентгеновском диапазоне 0.25–4 кэВ на коронографах белого света. Они показали неоднородность структуры КД в миллиметровом диапазоне. Области повышенного радиоизлучения, как правило, совпадают с

темными участками в (EUV SOHO/EIT) диапазоне. Увеличение интенсивности радиоизлучения полярных КД может быть связано с появлением полярных факелов, плюмов, ярких точек и сильных магнитных потоков. Иногда осветление в КД необъяснимо [10, 11].

Результаты наблюдения солнечного затмения 29.03.2006 г. на $\lambda = 1.03, 1.38, 2.3$ см на Северо-Восточном секторе РАТАН-600 показали, что полярная корональная дыра не видна на этих длинах волн. Плюмы, шлемообразные стримерные лучи и “псевдостримерные лучи”, которые коренятся внутри или вдоль границ корональных дыр, наблюдались в области полярной корональной дыры и на лимбе в белом свете и в диапазоне EIT [34–36]. Эти образования и спикеры создают неровности в структуре полярной корональной дыры.

Наблюдения полного солнечного затмения 29.03.2006 г. проводились одновременно на двух секторах РАТАН-600 разными методами. Наблюдения на Южном секторе с перископом РАТАН-600 (рис. 1) были выполнены в стандартном режиме наблюдений. Угловое разрешение горизонтальной ДНА радиотелескопа равно $15''$ – $30''$. Основным результатом этого наблюдения является обнаружение на длинах волн $\lambda = 1.84$ – 3.02 см мелкомасштабных компонентов радиоизлучения с размерами $40''$ – $70''$. Оценки яркостных температур ярких деталей этой структуры составляют 3000–6000 К [17].

На основе результатов вышеперечисленных работ о неоднородной структуре полярных корональных дыр, о лимбовых уярчениях и об уярчении радиоизлучения полярной корональной дыры на коротких длинах волн предполагается, что высокие яркостные температуры полярной корональной дыры на длинах волн 1.03, 1.38, 2.7 см и, как следствие, отсутствие видимости КД на этих длинах волн может быть вызвано присутствием униполярных магнитных полей вблизи северного полюса Солнца, полярных факелов и плюмов. Шибасаки [30] предположил, что уярчение полярных корональных дыр может быть обусловлено влиянием нагретой атмосферы, которая вытекает вдоль униполярного магнитного поля открытой структуры.

Идентичность характеристик экваториальных и полярных КД была отмечена в работах [37, 38] согласно результатам наблюдений в белом свете на коронографе спутника Скайлаб. Авторы Munro, Jackson работы [14] анализировали наблюдения КД, выполненное также в белом свете на коронографе спутника Скайлаб, и пришли к выводу, что “физические условия внутри корональной дыры не зависят от индивидуальной локализации на Солнце”.

Этот вывод подтвердился результатами наблюдения полного солнечного затмения 29.03.2006 г. на РАТАН-600 в сантиметровом диапазоне длин волн. Результаты наблюдения указали на идентичность температурных свойств КД независимо от их локализации на Солнце, следовательно, и от способа организации корональных дыр на Солнце в период минимальной солнечной активности [27].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдение солнечного затмения 29.03.2006 г. на РАТАН-600 позволило впервые определить распределение яркостных температур над Северным полюсом Солнца в пределах полярной корональной дыры на Солнце в широком диапазоне сантиметровых длин волн ($\lambda = 1.03, 1.38, 2.7, 6.2, 13.0, 30.7$ см) на интервале расстояний 1.005– $2.0 R_s$ от центра оптического диска Солнца. Анализ полученных результатов на сантиметровых длинах волн с привлечением опубликованных данных других авторов подтвердил резкое уменьшение яркостных температур радиоизлучения полярной корональной дыры вблизи солнечного лимба на $\lambda > 6$ см; отсутствие видимости полярной корональной дыры на коротких сантиметровых длинах волн (1.03, 1.38, 2.7 см); идентичность температурных свойств полярной КД и низкоширотных КД независимо от их расположения на Солнце и, следовательно, от их организации в период минимума солнечной активности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаю благодарность группе радиоинженеров РАТАН-600, обеспечившей успешное наблюдение солнечного затмения 29 марта 2006 г. на прецизионной радиотехнической аппаратуре: Н.А. Нижельскому, Г.Н. Жеканису, П.Г. Цыбулеву, Н.Н. Бурсову, С.Х. Тохчуковой за помощь в первичной обработке полученных данных, а также Н.А. Топчило за помощь в оформлении рисунков.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН в части “Проведение фундаментальных научных исследований”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. F. Bachurin, N. N. Eriushev, and L. I. Tsvetkov, *Izv. Krymsk. Astrofis. Obs.* **52**, 180 (1974).
2. G. A. Dulk and K. V. Sheridan, *Solar Phys.* **36**, 191 (1974).
3. F. L. Shimabukuro, W. J. Wilson, T. T. Mori, and P. L. Smith, *Solar Phys.* **40**, 359 (1975).

4. *A. N. Babin, S. Gopasiuk, V. A. Efanov, V. A. Kotov, I. G. Moiseev, and N. S. Nesterov*, *Izv. Krymsk. Astrofiz. Obs.* **55**, 3 (1976).
5. *V. A. Efanov, I. G. Moiseev, N. S. Nesterov, and R. T. Stewart*, *IAU Symp.* **86**, 141 (1980).
6. *Z. Wang, E. J. Schmahl, and M. R. Kundu*, *Solar Phys.* **111**, 419 (1987).
7. *V. N. Borovik*, *Lect. Notes Phys.* **432**, 185 (1994).
8. *N. Gopalswamy, K. Shibasaki, C. DeForest, B. Bromage, and G. Del Zanna*, *Synoptic Solar Physics*, *ASP Conf. Ser.* **140**, 363 (1998).
9. *N. Gopalswamy, K. Shibasaki, B. J. Thompson, C. DeForest*, *Geophysical Research*, **104**, A5, 9767 (1999).
10. *S. Pohjolainen*, *Astron. and Astrophys.* **361**, 349 (2000).
11. *A. Riehoakainen, S. Urpo, E. Valtaoja, V. I. Makarov, L. V. Makarova, and A. G. Tlatov*, *Astron. and Astrophys.* **366**, 676 (2001).
12. *S. R. Granmer*, *Living Rev. Solar Phys.* **6**, 3 (2009).
13. *G. A. Dulk, K. V. Sheridan, S. F. Smerd, G. L. Withbroe*, *Solar Phys.* **52**, 349 (1977).
14. *R. H. Munro, and B. V. Jackson*, *Astrophys. J.* **213**, 874 (1977).
15. *V. N. Borovik, M. S. Kurbanov, M. A. Livshits, and B. I. Ryabov*, *Sov. Astron.* **34**, 522 (1990).
16. *M. W. Ewell, Jr., H. Zirin, and J. B. Jensen, and T. S. Bastian*, *Astrophys. J.* **403**, 426 (1993).
17. *V. M. Bogod, O. A. Golubchina, G. N. Zhekanis, A. N. Korzhavin, V. S. Kotel'nikov, N. A. Nizhel'skij, P. G. Tsybulev*, *Astrophys. Bull.* **62**, 360 (2007).
18. *O. A. Golubchina, G. S. Golubchin*, *Astrofiz. Issled. (Izv. Spets. Astrofiz. Obs.)* **14**, 125 (1981).
19. *В. В. Железняков*, *Радиоизлучение Солнца и планет* (Наука, Москва, 1964).
20. *В. В. Соболев*, *Курс теоретической астрофизики* (Наука, Москва, 1967).
21. *O. A. Golubchina, A. N. Korzhavin, and S. Tokhchukova*, *Astrophys. Bull.* **66**, 4, 488 (2011).
22. *Nelson L. Reginald, O. C. St. Cyr, Joseph M. Davila, Douglas M. Rabin, Madhulika. Guhathakurta, Donald M. Hassler*, *Sol. Phys.* **260**, 347 (2009).
23. *O. A. Golubchina, V. M. Bogod, A. N., Korzhavin, N. N. Bursov, S. Kh. Tokhchukova*, *Astrophys. Bull.* **63**, 36 (2008).
24. *O. A. Golubchina, and A. N. Korzhavin*, *Astrophys. Bull.* **68**, 2, 219 (2013).
25. *L. A. Fisk, N. A. Schwadron*, *Astrophys. J.* **560**, 425 (2001).
26. *V. I. Abramenko, L. A. Fisk, V. B. Yurchyshyn*, *Astrophys. J.* **641**, L65 (2006).
27. *O. A. Golubchina*, *Geomagnetism and Aeronomy*, **57**, 964 (2017).
28. *C. L. Selhorst I, A. V. R. Silva, J. E. R. Costa, and K. Shibasaki*, *Astron. and Astrophys.* **401**, 1143 (2003).
29. *C. L. Selhorst I, A. V. R. Silva, and J. E. R. Costa*, *Astron. and Astrophys.* **440**, 367 (2005).
30. *K. Shibasaki*, *Publ. Astron. Soc. Jap.* **65**, S17 (2013).
31. *T. Kosugi, I. Masato, R. Shibasaki*, *Publ. Astron. Soc. Jap.* **38**, 1 (1986).
32. *J. E. Vernazza, E. H. Avrett, R. Loeser*, *Astrophys. J. Supp.* **45**, 635 (1981).
33. *A. J. Oliveira e Silva, C. L. Selhorst, P. J. A. Simões, C. G. Giménez de Castro*, *Astron. and Astrophys.* **592**, A91 (2016).
34. *J. M. Pasachoff, V. Rusin, M. Druckmuller, and M. Saniga*, *Astrophys. J.* **665**, 824 (2007).
35. *J. M. Pasachoff, V. Rusin, M. Druckmuller, H. Druckmullerova, et al.*, *Astrophys. J.* **682**, 638 (2008).
36. *Y.-M. Wang, J. B. Biersteker, N. R. Sheeley, Jr., S. Koutchmy, J. Mouette, M. Druckmuller*, *Astrophys. J.* **660**, 882 (2007).
37. *G. Withbroe, Y. Wang*, *Sol. Phys.* **27**, 394 (1972).
38. *R. Munro, G. Withbroe*, *Astrophys. J.* **176**, 511 (1972).