

УДК 523.947

АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯРНОЙ КОРОНАЛЬНОЙ ДЫРЫ НА СОЛНЦЕ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

© 2022 г. О. А. Голубчина*

Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории (СПбФ САО РАН),
г. Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: golubchina_olga@mail.ru

Поступила в редакцию 02.03.2021 г.

После доработки 28.03.2021 г.

Принята к публикации 24.09.2021 г.

Приведен анализ результатов исследования полярной корональной дыры по данным наблюдений солнечного затмения 29.03.2006 г. на радиотелескопе РАТАН-600 в широком сантиметровом диапазоне длин волн $\lambda = (1.03, 1.38, 2.7, 6.2, 13.0, 30.7)$ см. Кратко изложены обстоятельства затмения, методика обработки данных наблюдений. Обсуждены распределения яркостных температур в полярной корональной дыре Солнца от лимба оптического диска Солнца до расстояний, равных двум его радиусам. Обнаружено резкое уменьшение интенсивности радиоизлучения полярной корональной дыры на длинах волн $\lambda \geq 6$ см вблизи солнечного лимба. Исследован факт отсутствия регистрации полярной корональной дыры на длинах волн $\lambda = (1.03, 1.38, 2.7)$ см с привлечением данных более ранних наблюдений спокойного Солнца на радиотелескопах БПР и РАТАН-600. Обсуждается обнаруженная в радиодиапазоне идентичность температурных свойств полярной и низкоширотных корональных дыр. В дискуссии представлен обзор некоторых результатов исследования полярной корональной дыры Солнца по наблюдениям на радиотелескопах БПР, РАТАН-600, РТ-22 (КРАО), NoRH и других радиотелескопах с использованием данных (EUV SOHO/EIT) и данных теоретических работ.

DOI: 10.31857/S0016794022010096

1. ВВЕДЕНИЕ

Корональные дыры (КД) на Солнце являются важными и интересными образованиями солнечной атмосферы. Waldmeier [1956] в 1956–1957 гг. на коронографе Цюрихской обсерватории в зеленой линии 5303 Å впервые наблюдал КД за лимбом Солнца, как наименее интенсивное и долгоживущее образование. КД характеризуются как области пониженной температуры и плотности атмосферы Солнца. Это униполярные области с открытой конфигурацией магнитного поля. Полярные корональные дыры всегда видны на полюсах Солнца в периоды минимальной солнечной активности, так как в это время преобладает вращательно ориентированная дипольная компонента магнитного поля. КД могут присутствовать и в низких широтах Солнца. В этом случае линии открытого магнитного поля организуют КД либо случайными конвективными движениями в фотосфере, либо пересоединением силовых линий открытого магнитного поля с замкнутыми силовыми линиями [Fisk and Schwadron, 2001]. Низкая плотность в КД объяснена в работе [Abramenko et al., 2006]: скорость всплытия нового маг-

нитного потока в виде “эфемерных” биполей в КД в 2 раза меньше, чем в соседних областях спокойного Солнца. Вынос потока заряженных частиц из КД и низкая скорость всплытия новых магнитных биполей может объяснить низкую плотность частиц в КД Солнца. Интерес к КД вызван тем, что КД – это источник высокоскоростных потоков солнечной плазмы – солнечного ветра, который является источником геомагнитных возмущений. КД проявляются по-разному в различных диапазонах длин волн.

1. В ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазоне (0.25–4 кэВ) области, отождествленные с корональными дырами, наблюдаются как наиболее темные участки атмосферы Солнца, т.е. как места с пониженной плотностью и температурой [Cranmer, 2009].

2. В линии He I 10830 Å области, отождествленные с КД, являются областями с повышенной яркостью [Harvey et al., 1975; Обридко и Соловьёв, 2011].

3. В полярных областях Солнца в период минимума солнечной активности в миллиметровом

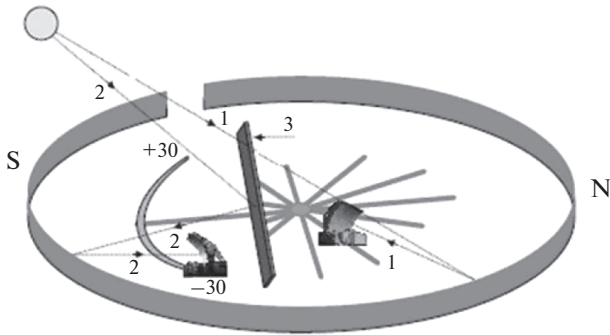


Рис. 1. Схема хода луча Солнца при наблюдении солнечного затмения 29.03.2006 г. при наблюдении методом “Эстафеты” на северо-восточном секторе (1) и в штатном режиме наблюдений на южном секторе с перископом (2) РАТАН-600.

диапазоне длин волн, как правило, наблюдалось повышение интенсивности радиоизлучения (редко понижение интенсивности излучения) [Pohjolainen, 2000; Riehoainen et al., 2001].

4. В сантиметровом диапазоне длин волн КД наблюдаются на Солнце как области пониженной интенсивности на $\lambda > 5$ см [Vogovik et al., 1990].

5. В радиодиапазоне на метровых и дециметровых волнах (Nancay Radioheliograph: $\lambda = 3, 6, 10$ м; Clark Lake Radioheliograph: $\lambda = 4, 6, 96$ м; Culgoora: $\lambda = 1.88, 3.75$ м) КД – области пониженной интенсивности [Dulk and Sheridan, 1974; Shibasaki et al., 2011].

6. В дециметровом диапазоне длин волн области КД проявляют как повышенную интенсивность радиоизлучения, так и пониженную. Неопределенность связана с неопределенностью отождествления наблюдаемой области на Солнце из-за влияния сильной радиорефракции [Lantos and Avignon, 1975].

2. НАБЛЮДЕНИЕ СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 29.03.2006 г. НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РАТАН-600

Наблюдение максимальной фазы (0.998) солнечного затмения 29 марта 2006 г. выполнено в режиме “Эстафеты” на северо-восточном секторе радиотелескопа РАТАН-600 (рис. 1) [Golubchina and Golubchin, 1981]. Радиотелескоп РАТАН-600 имеет ножевую диаграмму направленности антенны (рис. 2). Центр диаграммы направленности антенны (ДНА) был смещен по высоте относительно центра оптического диска Солнца на +15 угловых минут, поэтому центральная часть ДНА располагалась в северной полярной зоне, где находилась полярная корональная дыра. Это позволило наблюдать полярную КД и определить физические характеристики слабого излучения полярной КД над Северным полюсом Солнца.

Пространственное разрешение телескопа (ДНА) РАТАН-600 составляет минуты дуги: $\lambda = (1.03, 30.7)$ см; $(\rho_h \times \rho_v) \arcsin \min = (0.4 \times 17.3), (13.4 \times 84.4)$, где λ – длина волны наблюдения, угловые размеры горизонтальной (ρ_h) и вертикальной (ρ_v) диаграммы направленности антенны РАТАН-600 [Golubchina, 2017]. Задачей наблюдения солнечного затмения 29.03.2006 г. методом “Эстафеты” на РАТАН-600 было определение распределений яркостных температур полярной корональной дыры на Солнце в сантиметровом диапазоне длин волн. Эта задача выполнялась путем сравнения реальных наблюдений и полуэмпирических моделей Солнца (Луны). Основными процедурами моделирования являлись: задание моделей Солнца и Луны в виде систем концентрических колец с равномерным распределением яркости внутри каждого кольца и вычисление антенных температур $T_a(\varphi_0)$ из уравнения антенного сглаживания. Математическая модель Солнца (Луны) задавалась как сферически симметричная модель, состоящая из концентрических колец с равномерным распределением яркости внутри них. Яркостные температуры колец задавались различными способами: либо методом проб и ошибок, либо принимались значения, взятые из литературных данных [Железняков, 1964; Соболев, 1967]. Антенные температуры модели Солнца и Луны (T_a^C, T_a^L) вычисляются согласно полученным яркостным температурам Солнца и Луны (T_b^C, T_b^L), используя уравнения антенного сглаживания вертикальной диаграммой направленности антенны (ДНА):

$$T_a(\varphi_0) = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} T_b(\varphi) A(\varphi - \varphi_0) d\varphi. \quad (1)$$

Примечание. $T_a(\varphi_0)$ – антенная температура наблюдаемого источника; $T_b(\varphi)$ – распределение яркостной температуры по источнику; $A(\varphi - \varphi_0)$ – вертикальная диаграмма направленности антенны; $(\varphi - \varphi_0)$ – угол отклонения от центра ДНА; φ_1, φ_2 – пределы интегрирования по ДНА [Golubchina et al., 2011].

Степень совпадения моделированных распределений антенной температуры по Солнцу и Луне с реальной записью радиоизлучения Солнца и Луны во время наблюдения максимальной фазы солнечного затмения является оценкой качества модели (рис. 3а–3в) [Golubchina and Korzhavin, 2013].

Данные наблюдения солнечного затмения 29.03.2006 г. на РАТАН-600 позволили получить распределение яркостных температур над Северным полюсом Солнца в пределах полярной корональной дыры. Наблюдения выполнены в широком диапазоне сантиметровых длин волн

3. АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

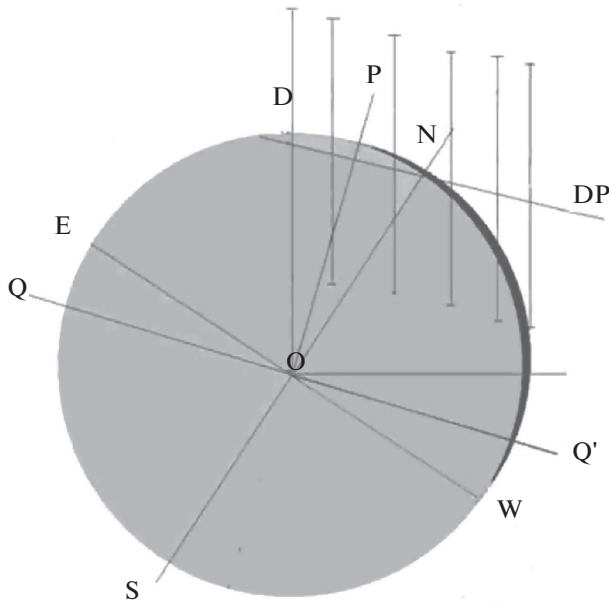


Рис. 2. Проекция небесных осей на солнечный диск: (EW) и (NS) – восточно-западное и северо-южное направления солнечного диска; (QQ') – проекция небесного экватора; OP – направление на Северный полюс мира. OD – направление диаграммы направленности радиотелескопа РАТАН-600; DP – суточная параллель; черная часть круга – это открытая часть Солнца на момент максимальной фазы солнечного затмения 29.03.2006 г. Отрезки вертикальных прямых показывают положение ножевой ДНА относительно оптического центра Солнца на разные моменты времени при наблюдении на северо-восточном секторе РАТАН-600.

Анализ и обсуждение приведенных результатов исследования полярной корональной дыры проводились путем сравнения их яркостных температур с яркостными температурами спокойного Солнца и крупных низкоширотных корональных дыр, полученными в стандартном режиме наблюдений на радиотелескопах БПР и РАТАН-600 в годы спокойного Солнца (1973–1976 гг.; 1984–1987 гг.), а также с привлечением опубликованных данных других авторов.

Распределение яркостных температур над Северным полюсом Солнца в пределах полярной корональной дыры на Солнце в сантиметровом диапазоне длин волн получено впервые на РАТАН-600 (рис. 4). Зарегистрировано уменьшение яркостных температур радиоизлучения полярной корональной дыры вблизи солнечного лимба на сантиметровых длинах волн $\lambda \geq 6$ см [Golubchina and Korzhavin, 2013]. Резкое падение яркостной температуры отчетливо проявляется на $\lambda = 13$ см в интервале расстояний от лимба оптического диска Солнца (1.005–1.03) R_s : $\lambda = 13$ см – $T_b = 45 \times 10^3$ К на расстоянии $R_s = 1.005$; $T_b = 10^4$ К на расстоянии $R_s = 1.03$. Значительное падение яркостной температуры вблизи лимба Солнца указывает на то, что полярная КД уверенно регистрируется на волнах 13 см, 30.7 см. Аналогичные результаты исследования среднеширотных и низкоширотных КД в годы минимальной солнечной активности были получены на радиотелескопах БПР и РАТАН-600 на волнах $\lambda > 5$ см [Borovik et al., 1990]. Яркостные температуры обсуждаемой полярной КД и яркостные температуры спокойного Солнца по данным наблюдений на близких длинах волн, полученные также в годы минимальной солнечной активности [Borovik et al.,

($\lambda = 1.03, 1.38, 2.7, 6.2, 13.0, 30.7$ см) на интервале расстояний $\sim(1.005-2.0)$ R_s от центра оптического диска Солнца (R_s – радиус оптического диска Солнца).

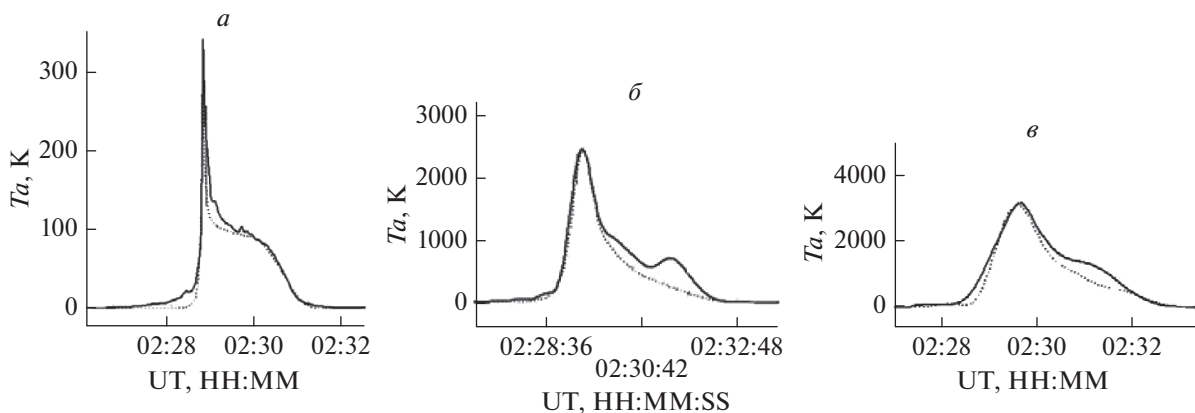


Рис. 3. Модельные (пунктирная линия) и полученные из наблюдений затмения (сплошная линия) кривые радиоизлучения Солнца и Луны на волнах: (1.03, 13.0, 30.7) см, (а, б, в). Превышение сигнала радиоизлучения Солнца справа на записи сигнала во время солнечного затмения над модельной кривой обусловлено радиоизлучением протуберанцев и восходящей группы пятен.

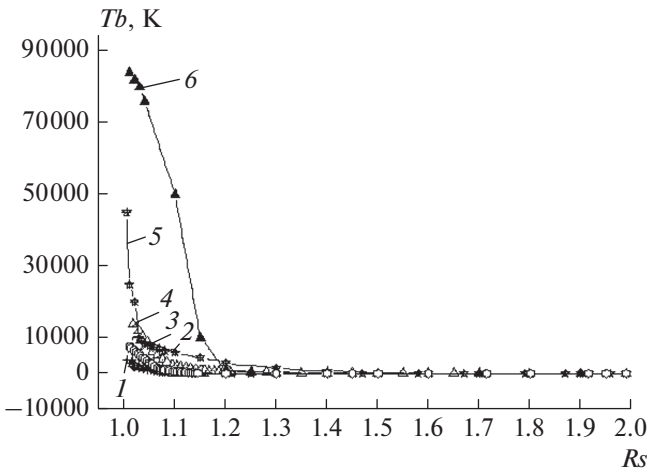


Рис. 4. Распределение яркостной температуры (T_b) с расстоянием от центра оптического диска Солнца (R_s) в полярной корональной области Солнца на волнах: 1 – 1.03 см; 2 – 1.38 см; 3 – 2.7 см; 4 – 6.2 см; 5 – 13.0 см; 6 – 30.7 см. R_s – радиус оптического диска Солнца [Golubchina and Korzhavin, 2013].

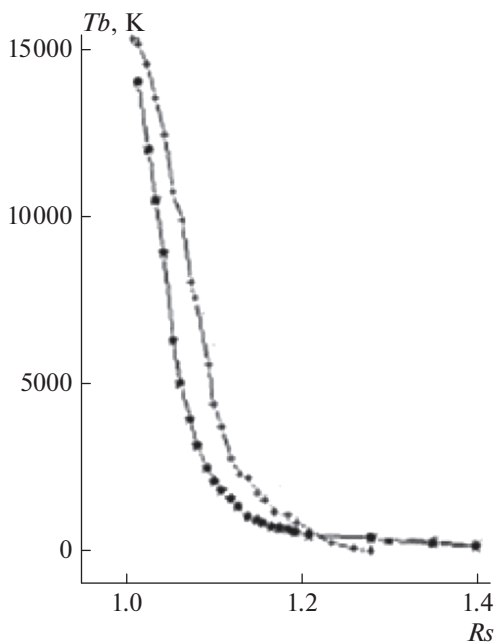


Рис. 5. Распределение яркостной температуры в солнечной короне на интервале расстояний (1–1.4) R_s . Здесь (★) обозначает значения яркостных температур (T_b) полярной корональной дыры, которые были обнаружены при наблюдении солнечного затмения 29.03.2006 г. на $\lambda = 6.2$ см; (+) обозначает значения (T_b), взятые из работы (Borovik et al., 1990) для спокойного Солнца на близкой длине волны 4.0 см.

1990], приведены в табл. 1. Сравнение этих величин показало, что яркостные температуры (T_b) полярной корональной области над Северным полюсом Солнца ниже, чем (T_b), полученные в

соответствии с наблюдениями спокойного Солнца на близких длинах волн (табл. 1, рис. 5). Последнее также подтверждает существование полярной КД над Северным полюсом Солнца 29 марта 2006 г. на $\lambda \geq 6$ см.

При исследовании крупных низкоширотных КД на фоне спокойного Солнца в работе [Borovik et al., 1990] было установлено, что КД не видны на коротких сантиметровых волнах $\lambda \leq 5$ см. Аналогичный вывод был получен согласно результатам исследования полярной КД (29.03.2006 г.) на РАТАН-600: полярная корональная дыра не видна на коротких сантиметровых длинах волн: $\lambda = 1.03, 1.38, 2.7$ см (рис. 4). Сравнение распределения яркостных температур полярной КД и спокойного Солнца на $\lambda = 2.7$ см [Golubchina and Korzhavin, 2013] также подтвердило тот факт, что на волне $\lambda = 2.7$ см полярная корональная дыра не видна (рис. 6).

Как было отмечено выше, механизм образования полярной КД отличается от организации КД вне полярных областей [Fisk and Schwadron, 2001]. Линии открытого магнитного поля организуют КД либо случайными конвективными движениями в фотосфере, либо пересоединением силовых линий открытого магнитного поля с замкнутыми силовыми линиями. Тем не менее, приведенные выше результаты исследований полярной КД и крупных низкоширотных КД на фоне спокойного Солнца в период минимальной солнечной активности показали идентичность температурных характеристик КД на близких волнах радиоизлучения, т.е. нет температурной зависимости от того, на какой широте расположена КД. Это означает, что температурные характеристики КД не зависят от способа организации корональных дыр на Солнце. В семидесятые-восемидесятые годы XX века с развитием космических программ активизировались исследования Солнца в ультрафиолетовом диапазоне со спутниковOSO-4 и в белом свете на коронографе спутника Skylab. В работах [Withbroe and Wang, 1972; Munro and Withbroe, 1972; Munro and Jackson, 1977] в ультрафиолетовом диапазоне и в белом свете была отмечена идентичность физических условий в экваториальных и полярных КД. Приведенные выше результаты исследований радиоизлучения полярной и низкоширотных КД на РАТАН-600 выявили такое же свойство КД в микроволновом радиодиапазоне (таблица) [Golubchina, 2017].

4. ДИСКУССИЯ

В многочисленных работах, связанных с исследованием микроволнового излучения КД на Солнце, отмечается, что КД на коротких волнах сантиметрового диапазона не видны. Возможная причина этого явления, а также проблема усиления микроволнового радиоизлучения полярных

корональных дыр на Солнце, изучались многими исследователями. Некоторые из этих работ попытаемся коротко напомнить и обсудить.

4.1. Полярные корональные дыры на Солнце в микроволновом диапазоне

Наблюдения полярных корональных дыр впервые были выполнены в КрАО на волнах 8.2 и 13.5 мм (1974–1977 гг.) на радиотелескопе РТ-22 и в Австралии на волне 3.5 мм (CSIRO) на параболоиде с диаметром 4 м [Babin et al., 1976; Dulk and Sheridan, 1974]. В КрАО наблюдения полярных КД были выполнены на широтах вплоть до $\varphi = 80^\circ$. На больших широтах наблюдения в радиодиапазоне невозможны из-за большого градиента температуры вблизи лимба Солнца. Обнаружено, что полярные КД – это области повышенной интенсивности радиоизлучения в миллиметровом диапазоне длин волн. Так, на $\lambda = 8.2$ мм превышение над уровнем спокойного Солнца $dT = 1500$ К, а на $\lambda = 13.5$ мм $dT = 2200$ К. Значения $dT = 240–560$ К, полученные согласно аналогичным измерениям, выполненным в Японии [Shimabukuro et al., 1975] на радиотелескопе диаметром 45 м на $\lambda = 8.3$ мм. На волне $\lambda = 3.1$ мм повышение интенсивности над уровнем спокойного Солнца не было обнаружено. Результаты наблюдений на 45-метровом радиотелескопе Нобеяма на волнах 8.3 мм и 3.1 мм (1984 г.) показали уярчение (3–7)% на $\lambda = 8.3$ мм вблизи полюсов на широтах $>65^\circ$ [Kosugi et al., 1986]. В этой работе было обращено внимание на усиление миллиметрового излучения полярной КД и усиления униполярного магнитного поля внутри КД.

4.2. Лимбовое и полярное уярчения

Наблюдения Солнца в оптическом диапазоне, ультрафиолетовом и рентгеновском излучении и в микроволновом радиодиапазоне позволили исследовать лимбовое уярчение солнечного излучения и усиление излучения полярных областей. Такие исследования нередко выполнялось при одновременном сопоставлении результатов наблюдений с разработанными моделями солнечной атмосферы. По данным наблюдений солнечного затмения 30.06.73 г. ($\lambda = 3.3$ мм) на радиотелескопе, диаметр которого равнялся ~ 1 м, пространственное разрешение – 14 угловым минутам, был сделан вывод, что на лимбе существуют неоднородные особенности, радиоизлучение которых усредняется ДНА [Shimabukuro et al., 1975].

Усиление интенсивности радиоизлучения полярной корональной дыры на коротких волнах активно исследовалось на радиогелиографе NoRH на $\lambda = 1.76$ см с привлечением данных магнитограмм, изображений ультрафиолетового излучения (EUV), полученных одновременно доплеров-

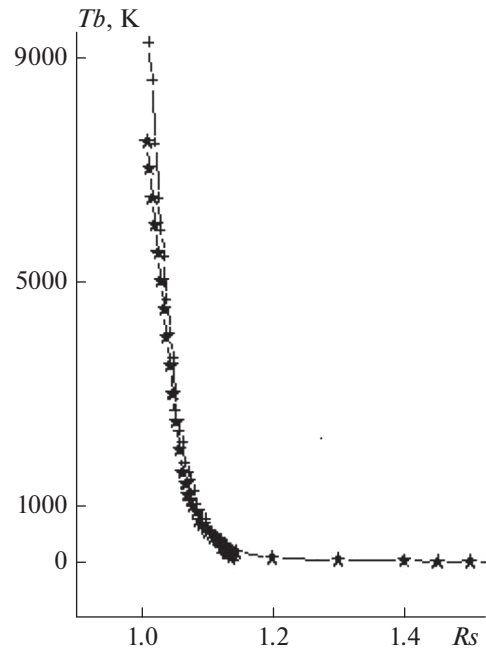


Рис. 6. Распределение яркостной температуры Солнца, полученной во время солнечного затмения 29 марта 2006 г. (*), и яркостной температуры спокойного Солнца (+) на $\lambda = 2.7$ см (Borovik et al., 1990).

ским тепловизором Майкельсона, и изображений в экстремальном ультрафиолете (EUV SOHO/EIT). В результате исследования было установлено, что радиоусиление обусловлено “усиленными униполярными магнитными областями, лежащими в основе корональной дыры”. Структура микроволнового уярчения состоит из сглаженного компонента, “происходящего из внутренних ячеек сетки, и компактного компонента, связанного с сетевыми магнитными элементами”. Точечные источники обусловлены взаимодействием эле-

Таблица 1. Яркостные температуры (T_b , К) спокойного Солнца ($S1$), средние полуэмпирически согласованные модельные данные низкоширотной корональной дыры ($CH1$) на фоне спокойного Солнца и полярной корональной дыры ($CH2$) на близких длинах волн

КД	$\lambda^{(1)}$ (см); $T_b \times 10^3$ К			$\lambda^{(2)}$ (см); $T_b \times 10^3$ К		
	6	15	31.6	6.2	13	30.7
CH (1)	19.6	39	86	–	–	–
S (1)	24.7	63	174	–	–	–
CH (2)	–	–	–	14	45	84
R_s	–	–	–	1.017	1.005	1.01

Примечание. Здесь $\lambda^{(1)}$ – данные работы [Borovik et al., 1990]; $\lambda^{(2)}$ – результаты наблюдения солнечного затмения 29 марта 2006 г. на РАТАН-600; R_s – расстояние точек измерения, ближайших к солнечному лимбу, от центра солнечного диска во время солнечного затмения.

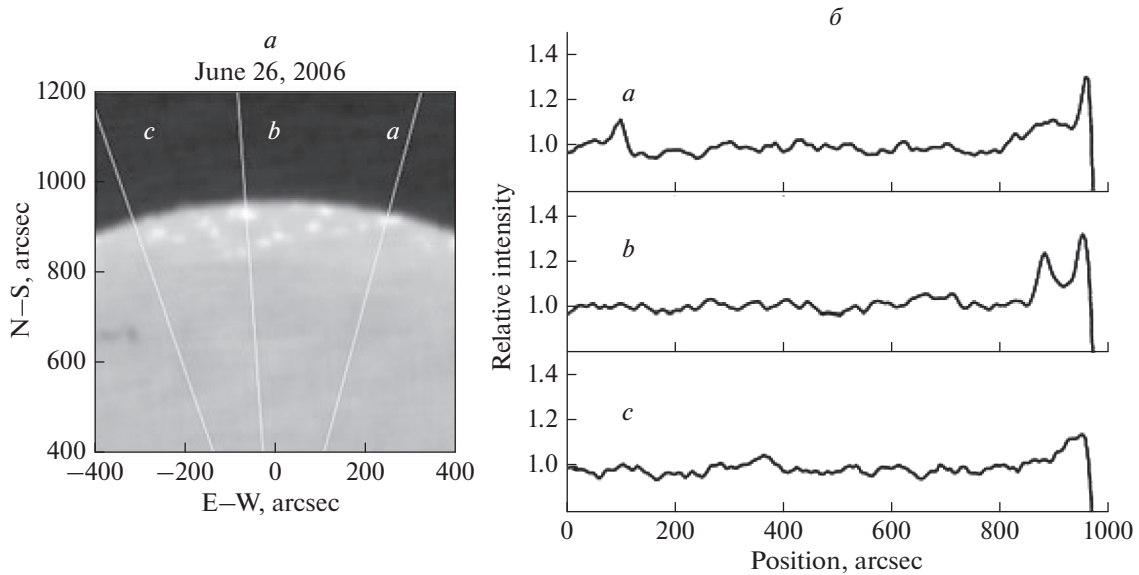


Рис. 7. Яркие участки (*a*) наблюдаются около Северного полюса Солнца в течение минимума солнечной активности на 17 ГГц (NoRH наблюдения). Белые линии представляют три скана на карте, профили которых показаны справа (*б*). Скан (*a*) проходит один яркий участок, скан (*b*) – через два участка, и скан (*c*) показывает только фоновое уярчение лимба [Selhorst et al., 2010].

ментов разной полярности. Они видны в корональных линиях EUV, а также в EIT 304 Å, но не видны на микроволнах [Gopalswamy et al., 1999].

Результаты исследований наблюдений на $\lambda = 1.76$ см на радиогелиографе Нобеяма (NoRH) также представлены в работе [Selhorst et al., 2003]. Было обнаружено, что уярчение вблизи лимба на полюсах в период минимума солнечной активности ~25%, вблизи экватора ~15%, в промежуточных областях ~10%. Уярчение на полюсах на $\lambda = 1.76$ см связано с факелами. Установлено, что усиленное радиоизлучение на $\lambda = 1.76$ см неоднородно с яркими пятнами вблизи лимба. Чтобы понять причину усиления радиоизлучения вблизи полюсов на $\lambda = 1.76$ см, было рассмотрено несколько модификаций атмосферной модели SSC 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 [Selhorst et al., 2005]. Яркостные температуры этих полярных пятен могут быть на 40% выше яркостной температуры спокойного Солнца. Межспикульные дыры расположены над полярными факелами. 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 (рис. 7*a*, 7*б*).

Спикулы являются хромосферными структурами. Они наблюдаются в H α . Основание спикул определяется на высоте 1000 км над фотосферой.

Спикулы покрывают от 1% до 10% солнечной поверхности. Спикулы достигают высоты более 3000 км над поверхностью Солнца. Они присутствуют в областях солнечной атмосферы, где производится радиоизлучение на 17 ГГц (1.76 см). Для понимания усиления радиоизлучения полярных корональных дыр на коротких волнах необходимо принимать во внимание наличие спикул и межспикульных дыр.

Исследования полярных корональных дыр были выполнены в Финляндии (Metsahovi Radio Observatory) с помощью радиотелескопа диаметром 14 м на волнах 8, 3.4, 3.5 мм. Одновременно были выполнены наблюдения в белом свете в Кисловодске, а также наблюдения в ультрафиолете (EUV SOHO/EIT) и в мягком рентгене (0.25–4 кэВ). Усиление интенсивности радиоизлучения полярных КД может быть связано с появлением полярных факелов, плюмов, ярких точек и сильных магнитных потоков. Иногда осветление в КД необъяснимо [Pohjolainen, 2000; Riehoakainen et al., 2001]. Полярные факелы могут находиться вблизи границ КД. Области повышенного радиоизлучения в общем совпадают с темными поверхностями в EUV (SOHO/EIT).

Радиоизлучение Солнца на $\lambda = 1.76$ см формируется в верхней хромосфере, а излучение экстремальных ультрафиолетовых (EUV) линий 304 Å и 171 Å выходит из переходной области и короны. В работах [Oliveira e Silva et al., 2016; Selhorst et al., 2003] сделан вывод, что наличие ярких пятен, тесно связанных с присутствием интенсивных униполярных магнитных областей, лежащих в основе

корональных дыр, является источником усиления радиоизлучения на $\lambda = 1.76$ см. В работе [Shibasaki, 2013] автор предположил, что истечение нагретой атмосферы, вытекающей вдоль униполярного магнитного поля открытой конфигурации, является причиной уярчения полярной корональной дыры.

В работе [Wang et al., 2007] проведен анализ сложной лучеобразной структуры короны Солнца в белом свете по данным наблюдений фотографий солнечного затмения 29.03.2006 г. в белом свете и изображений, полученных с SOHO. Сделан вывод, что существуют 3 категории линейных особенностей солнечной короны в белом свете: “полярные и низкоширотные плюмы, которые лежат над маленькими магнитными диполями внутри корональных дыр; шлемовидные стримеры, которые лежат над большими аркадами петель и разделяют корональные дыры противоположной полярности; псевдостримерные лучи, которые лежат над двойными петельными аркадами и разделяют корональные дыры той же самой полярности”. Во время солнечного затмения 29.03.2006 г. в полярной области солнечной короны в белом свете наблюдался необычайно яркий плюм [Pasachoff et al., 2007]. По-видимому, все эти структуры также могут быть причиной усиления радиоизлучения полярных корональных дыр на коротких волнах.

5. ВЫВОДЫ

Сформулируем кратко результаты наблюдений солнечного затмения 29.03.2006 г. на РАТАН-600.

1. 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 ($\sim 1.005 - 2.0$) R_s от центра оптического диска Солнца и определить некоторые температурные характеристики радиоизлучения на этих волнах.

2. Обнаружено резкое уменьшение яркостных температур радиоизлучения полярной корональной дыры на длинах волн $\lambda \geq 6$ см вблизи солнечного лимба, что подтвердило реальную регистрацию полярной корональной дыры над Северным полюсом Солнца.

3. Полярная корональная дыра не видна на коротких сантиметровых длинах волн $\lambda = (1.03, 1.38, 2.7)$ см.

4. Совпадение яркостных температур полярной корональной дыры и больших низкоширотных корональных дыр на фоне спокойного Солнца на близких длинах волн сантиметрового радиоизлучения Солнца свидетельствует об идентично-

сти температурных свойств полярной КД и низкоширотных КД независимо от их расположения на Солнце и, следовательно, от механизма их организации в период минимума солнечной активности.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаю благодарность группе радиоинженеров РАТАН-600, обеспечившей успешное наблюдение на прецизионной радиотехнической аппаратуре: Н.А. Нижельскому, Г.Н. Жеканису, П.Г. Цыбулеву, Н.Н. Бурсову.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Железняков В.В. Радиоизлучение Солнца и планет. М.: Наука, 558 с. 1964.
- Обридко В.Н., Соловьёв А.А. Магнитогидростатическая модель корональной дыры // Астрон. журн. Т. 88. № 12. С. 1238–1248. 2011.
- Соболев В.В. Курс теоретической астрофизики. М.: Наука, 528 с. 1967.
- Abramenko V.I., Fisk L.A., Yurchyshyn V.B. The rate of emergence of magnetic dipoles in coronal holes and adjacent quiet – sun regions // Astrophys. J. V. 641. L65–L68. 2006.
- Babin A.N., Gopasiuk S., Efanov V.A. et al. Enhancement of magnetic fields, radio brightness at mm-wavelengths and H-alpha activity at the polar regions of the Sun // Krymskaia Astrofizicheskaia Observatoriia, Izvestiia. V. 55. P. 3–13. 1976. (In Russian)
- Borovik V.N., Kurbanov M.S., Livshits M.A., Ryabov B.I. Coronal holes on the background of the quiet sun – Analysis of RATAN-600 observations in the 2–32-cm range // Soviet Astronomy. V. 34. P. 522–534. 1990.
- Cranmer S.R. Coronal Holes // Living Reviews in Solar Physics. V. 6. № 1. P. 3–66. 2009.
- Dulk G.A., Sheridan K.V. The structure of the middle corona from observations at 80 and 60 MHz // Solar Phys. V. 36. P. 191–202. 1974.
- Fisk L.A., Schwadron N.A. The behavior of the open magnetic field of the Sun // Astrophys. J. V. 560. P. 425–438. 2001.
- Golubchina O.A., Golubchin G.S. The Relay – Race Method // Astrofiz. Issled. Izv. Spets. Astrofiz. Obs. V. 14. P. 125–131. 1981.
- Golubchina O.A., Korzhavin A.N., Tokhchukova S. Brightness temperature distribution in solar corona based on RATAN-600 observations of the maximum phase of the March 29, 2006 solar eclipse // Astrophys. Bull. V. 66. № 4. P. 488–495. 2011.
- Golubchina O.A., Korzhavin A.N. Distribution of centimeter-wave brightness temperature of solar polar region // Astrophys. Bull. V. 68. № 2. P. 219–225. 2013.

- *Golubchina O.A.* Manifestation of the identity of brightness temperatures of the polar coronal hole and low-latitude zonal holes in the centimeter wave range // *Geomagn. Aeron.* V. 57. № 8. P. 964–967. 2017.
- *Gopalswamy N., Shibasaki K., Thompson J., DeForest C.* Microwave enhancement and variability in the elephant's trunk coronal hole: Comparison with SOHO observations // *J. Geophys. Res.* V. 104. N A5. P. 9767–9779. 1999.
- *Harvey J., Krieger A.S., Davis J.M., Timothy A.F., Valana G.S.* Comparison of Skylab X-ray and ground-based Helium observations // *The Bulletin of the American Astronomical Society (BAAS)*. V. 7. P. 358. 1975.
- *Kosugi T., Ishiguro Masato, Shibasaki Rioto.* Polar-cap and coronal-hole-associated brightenings of the Sun at millimeter wavelengths // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. V. 38. P. 1–11. 1986.
- *Lantos P., Avignon Y.* The metric quiet sun during two cycles of activity and the nature of the coronal holes // *Astron. Astrophys.* V. 41. P. 137–142. 1975.
- *Munro R., Withbroe G.* Properties of a coronal “hole” derived from extreme – ultraviolet observations // *Astrophys. J.* V. 176. P. 511–520. 1972.
- *Munro R.H., Jackson B.V.* Physical properties of a polar coronal hole from 2 to 5 Rs // *Astrophys. J.* V. 213. P. 874–886. 1977.
- *Oliveira e Silva A.J., Selhorst C.L., Simões P.J.A., Giménez de Castro C.G.* Comparison of solar radio and extreme ultraviolet synoptic limb charts during the present solar maximum // *Astron. Astrophys.* V. 592. A91. 2016.
- *Pasachoff J. M., Rusin V., Druckmüller M., Saniga M.* Fine structures in the white – light solar corona at the 2006 eclipse // *Astrophys. J.* V. 665. P. 824–829. 2007.
- *Pohjolainen S.* On the origin of polar radio brightenings at short millimeter wavelengths // *Astron. Astrophys.* V. 361. P. 349–358. 2000.
- *Riehkainen A., Urpo S., Valtaoja E., et al.* Millimeter-radio, SOHO/EIT 171 – A features and the polar faculae in the polar zones of the Sun // *Astron. Astrophys.* V. 366. P. 676–685. 2001.
- *Selhorst C.L., Silva A.V.R., Costa J.E.R., Shibasaki K.* Temporal and angular variation of the solar limb brightening at 17 GHz // *Astron. Astrophys.* V. 401. P. 1143–1150. 2003.
- *Selhorst C.L., Silva A.V.R., Costa J.E.R.* Solar atmospheric model with spicules applied to radio observation // *Astron. Astrophys.* V. 440. P. 367–371. 2005.
- *Selhorst C.L., Giménez de Castro C., Varela Saraiva A.C., Costa J.E.R.* How are the EUV and radio polar limb-brightenings correlated? // *Astron. Astrophys.* V. 509. № A51. 2010.
- *Shimabukuro F.L., Wilson W.J., Mori T.T., Smith P.L.* 3.3 millimeter limb brightening measurements during the 30 June 1973 total solar eclipse // *Solar Phys.* V. 40. P. 359–370. 1975.
- *Shibasaki K., Alissandrakis C.E., Pohjolainen S.* Radio emission of the quiet Sun and active regions // *Solar Phys.* V. 273. P. 309–337. 2011.
- *Shibasaki K.* Long-term global solar activity observed by the Nobeyama radioheliograph // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. V. 65. S17. 2013.
- *Waldmeier M.* Synoptische Karten der Sonnenkorona. Mit 16 Textabbildungen // *Zeitschrift für Astrophysik*. V. 38. P. 219–236. 1956.
- *Wang Y.M., Biersteker J.B., Sheeley N.R. et al.* The Solar Eclipse of 2006 and the origin of raylike features in the white-light // *Astrophys. J.* V. 660. P. 882–892. 2007.
- *Withbroe G., Wang Y.* A model for the polar transition layer and corona for November 1967 // *Solar Phys.* V. 27. P. 394–401. 1972.