

Температурные характеристики радиоизлучения полярных корональных дыр на Солнце.

Голубчина О.А.

СПб Ф СО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, golubchina_olga@mail.ru

Полярные корональные дыры всегда видны на полюсах Солнца в периоды минимальной солнечной активности, т.к. в это время преобладает вращательно ориентированная дипольная компонента магнитного поля. Линии открытого магнитного поля организуют КД: а) случайными конвективными движениями в фотосфере. б) пересоединениями силовых линий открытого магнитного поля с замкнутыми силовыми линиями.

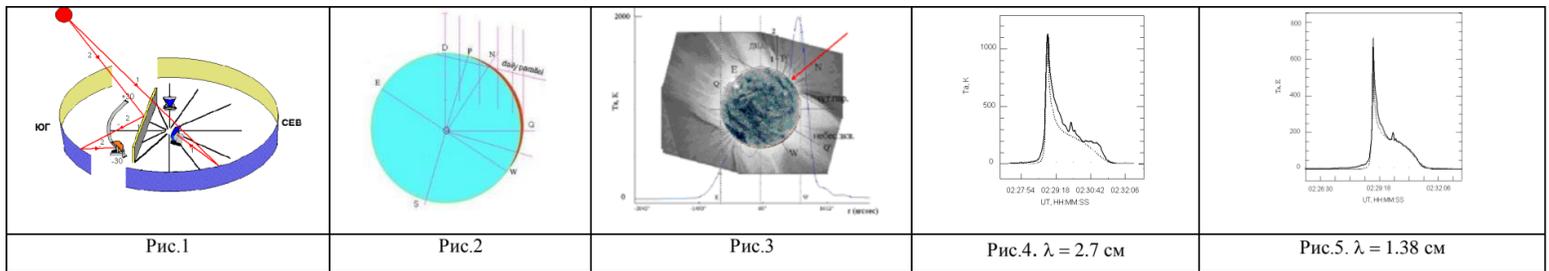


Рис.4-5. Модельные (пунктирная линия) и полученные из наблюдений затмения (сплошная линия) кривые радиоизлучения Солнца и Луны на волнах $\lambda = 2.7$ см, 1.38 см.

1. Наблюдение солнечного затмения 29 марта 2006 года на РАТАН-600

В данной работе мы приводим анализ результатов наблюдения максимальной фазы солнечного затмения 29 марта 2006 года в режиме "Эстафеты" на Северо-Восточном секторе радиотелескопа РАТАН-600 (рис.1) на длинах волн $\lambda = (1.03, 1.38, 2.7, 6.2, 13.0, 30.7)$ см (О.А. Голубчина. АЖ, 2021, том 98, № 4, с. 332- 341).

В момент максимальной фазы солнечного затмения (11:17 UT) открытая часть оптического диска Солнца составляла 0.2 %. Центр диаграммы направленности антенны был смещен на +15 дуговых мин к Северу от центра оптического диска Солнца (рис.2). Таким образом, центральная часть ДНА располагалась в северной полярной зоне, где находилась полярная корональная дыра (КД, рис.3). Радиотелескоп РАТАН-600 имеет ножевую диаграмму направленности: $\lambda = 1.03$ см - $(\rho \times \rho \nu = 0.4 \times 17.3)$ arcmin; $\lambda = 30.7$ см - $(\rho \times \rho \nu = 13.4 \times 84)$ arcmin (рис.2). Здесь λ – длина волны наблюдения. Антенные температуры модели T_a^C , T_a^I вычисляются согласно полученным T_b^C , T_b^I , используя уравнения антенного сглаживания горизонтальной диаграммой направленности антенны (ДНА): $T_a(\varphi_0) = \int T_b(\varphi_0) A(\varphi - \varphi_0) d\varphi$. 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. Были созданы одномерные файлы радиусов и соответствующих яркостных температур для Солнца (Луны). Значения T_b задавались согласно литературным данным, или путём проб и ошибок (О.А. Golubchina, A.N. Korzhavin, and S. Tokhchukova, *Astrophys. Bull.* **66**, 4, 488 (2011)).

2. Сопоставление полученных модельных и реальных наблюдений

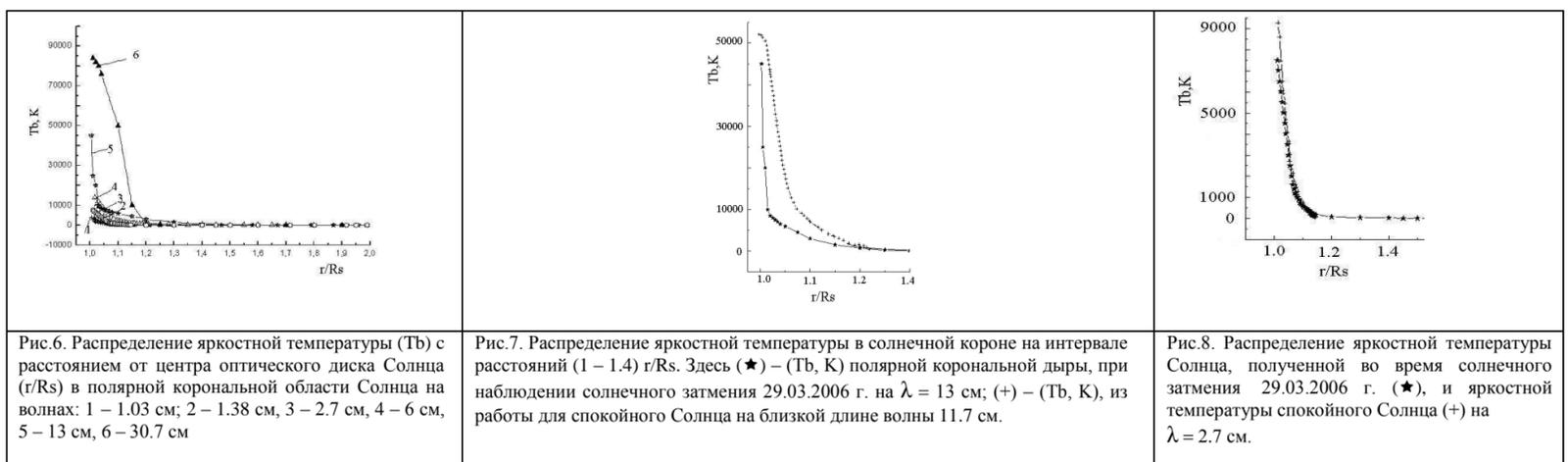


Рис.6. Распределение яркостной температуры (T_b) с расстоянием от центра оптического диска Солнца (r/R_s) в полярной корональной области Солнца на волнах: 1 – 1.03 см; 2 – 1.38 см, 3 – 2.7 см, 4 – 6 см, 5 – 13 см, 6 – 30.7 см

Рис.7. Распределение яркостной температуры в солнечной короне на интервале расстояний (1 – 1.4) r/R_s . Здесь (★) – (T_b , K) полярной корональной дыры, при наблюдении солнечного затмения 29.03.2006 г. на $\lambda = 13$ см; (+) – (T_b , K), из работы для спокойного Солнца на близкой длине волны 11.7 см.

Рис.8. Распределение яркостной температуры Солнца, полученной во время солнечного затмения 29.03.2006 г. (★), и яркостной температуры спокойного Солнца (+) на $\lambda = 2.7$ см.

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

Таблица 2. Яркостные температуры (T_b , K) 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. Здесь $\lambda^{(1)}$ - данные работы V.N. Borovik, M.S. Kurbanov, M.A. Livshits, and B.I. Ryabov, *Sov. Astron.* **34**, 522 (1990); $\lambda^{(2)}$ - результаты наблюдения солнечного затмения 29 марта 2006 года на РАТАН-600, r/R_s - расстояние от центра солнечного диска точек измерения, ближайших к солнечному лимбу во время солнечного затмения.

Дискуссия

- 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 параболаиде с диаметром 4 м (1977 г). Было показано, что полярные КД – это области повышенной интенсивности радиоизлучения в мм диапазоне длин волн ($\lambda = 8.2$ мм, $dT = 1500$ K; $\lambda = 13.5$ мм, $dT = 2200$ K).
- Лимбовое и полярное уярчение.** 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. Вывод: на лимбе существуют неоднородные особенности, радиоизлучение которых усредняется ДНА.
- Усиление интенсивности радиоизлучения полярной корональной дыры на коротких волнах.** В исследовании причины усиления интенсивности радиоизлучения полярной корональной дыры на коротких волнах активно использовались наблюдения солнечного радиоизлучения на $\lambda = 1.76$ см, полученные на радиогелиографе NoRH и данные ультрафиолетового излучения EUV (SOHO) с коронографов на спутниках. Авторы 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. Уярчение на полюсах на $\lambda = 1.7$ см связано с факелами. Было получено, что усиленное радиоизлучение на $\lambda = 1.7$ см неоднородно с яркими пятнами вблизи лимба. Межпиксельные дыры расположены над полярными факелами, а яркие полярные пятна, наблюдаемые на $\lambda = 1.7$ см расположены близко к областям полярных факелов. Эти модели хорошо согласуются с результатами наблюдений полярных уярчений на $\lambda = 1.7$ см



Яркие участки наблюдаются около Северного полюса в течение минимума солнечной активности на 17 ГГц (NoRH наблюдения). Белые линии представляют три скана на карте, профили которых показаны справа. Скан (а) проходит один яркий участок, скан (b) – через два участка, и скан (с) показывает только фоновое уярчение лимба (Selhorst 2010).

Пример области без спикул вблизи полюса, между 80° и 90° (Selhorst 2005).

Нитеподобные полярные плюмы – плазма, текущая вдоль суперрадиально расширяющихся линий магнитного поля. Плюмы могут наблюдаться внутри КД (радиоповышения интенсивности на 3.5 мм равны 1-1.5%) (Pasachoff et.al. 2007).

КД видны как депрессии с локальными радиоуярчениями внутри них (яркие точки и основы плюмов). Иногда уярчения в КД необъяснимы. Яркие точки в X-ray обнаружены в мм и см излучении. Их идентифицировали как биполи и подмножество тёмных точек в He I. На основе анализа данных наблюдения радиоизлучения Солнца на $\lambda = 1.7$ см, излучение которого формируется в верхней хромосфере и экстремальные ультрафиолетовые (EUV) авторы приходят к заключению, что усиление радиоизлучения на $\lambda = 1.7$ см обусловлено наличием ярких пятен, тесно связанных с присутствием интенсивных униполярных магнитных областей, лежащих в основе корональных дыр. В Финляндии (Metsahovi Radio Observatory): РТ, $d = 14$ м; $l = 8, 3.4, 3.5$ мм; наблюдения в белом свете в Кисловодске, в ультрафиолете (EUV SOHO/EIT), в мягком рентгене (0.25–4 keV). Выводы: 1). Увеличение интенсивности радиоизлучения полярных КД может быть связано с появлением полярных факелов, плюмов, ярких точек и сильных магнитных потоков. 2). Иногда осветление в КД необъяснимо (Pohjolainen 2000; Riehokainen 2001). 3). Полярные факелы могут находиться вблизи границ КД. 4). Области повышенного радиоизлучения в общем совпадают с тёмными поверхностями в EUV (SOHO/EIT). Шибасаки предположил, что уярчение полярной корональной дыры связано с истечением нагретой атмосферы, вытекающей вдоль униполярного магнитного поля открытой конфигурации.

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 $\sim (1.005-2.0)$ R_s от центра оптического диска Солнца. Анализ результатов распределения яркостной температуры полярной корональной дыры над Северным полюсом Солнца на расстояниях (1.005-2.0) R_s от центра оптического диска Солнца на сантиметровых длинах волн с привлечением опубликованных данных других авторов подтвердил выводы, полученные нами из наблюдений солнечного затмения 29.03.2006 г. на РАТАН – 600:

- Обнаружено резкое уменьшение яркостных температур радиоизлучения полярной корональной дыры на сантиметровых длинах волн (рис.7). ($\lambda > 6$ см вблизи солнечного лимба, что подтвердило реальную регистрацию полярной корональной дыры над Северным полюсом Солнца).
- Полярная корональная дыра не видна на коротких сантиметровых длинах волн (1.03, 1.38, 2.7 см).
- Совпадение яркостных температур полярной корональной дыры и больших низкоширотных корональных дыр на близких длинах волн в Северном полушарии Солнца свидетельствует об идентичности температурных свойств полярной КД и низкоширотных КД независимо от их расположения на Солнце и, следовательно, от механизма их организации в период минимума солнечной активности.