

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЯРКОСТНЫХ ТЕМПЕРАТУР В ПОЛЯРНОЙ
КОРОНАЛЬНОЙ ДЫРЕ НА РАССТОЯНИЯХ ОТ ЛИМБА СОЛНЦА
ДО ДВУХ РАДИУСОВ СОЛНЦА ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ
В САНТИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН НА РАТАН-600**

Голубчина О.А.

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

**DISTRIBUTION OF BRIGHTNESS TEMPERATURES IN THE POLAR
CORONAL HOLE AT DISTANCES FROM THE SUN'S LIMB TO TWO
SOLAR RADII ACCORDING TO OBSERVATIONS IN CENTIMETER
WAVELENGTHS ON THE RATAN-600**

Golubchina O.A.

St. Petersburg Branch of Special Astrophysical Observatory, St. Petersburg, Russia

This article presents an overview of the main results of the study of the polar coronal hole (CH) over the North pole of the Sun based on observations of the solar eclipse on March 29, 2006. The observations were made on the RATAN-600 radio telescope in a wide cm-range of wavelengths: 1.03, 1.38, 2.7, 6.2, 13.0, 30.7 cm. The RATAN-600 is the radio telescope of the Russian Academy of Sciences. The results obtained are discussed: the distribution of the brightness temperatures of the polar coronal hole above the North pole of the Sun at distances of approximately (1.005–2.0) R_s (R_s – the radius of the Sun); the identity of the temperature properties of the polar CH and low-latitude coronal holes (CHs) on the Sun during the period of minimal solar activity. The results were analyzed using observational and theoretical data published by various authors. We discuss the enhance of the microwave radiation of the polar coronal hole registered on short waves from observations of the total solar eclipse on March 29, 2006 using the RATAN-600 telescope. Comparison of the obtained brightness temperatures of the polar CH with the brightness temperatures of low-latitude CHs observed earlier at close wavelengths indicates the identity of the temperature properties of the CHs regardless of their location on the Sun and of their organization during the period of minimum solar activity

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-65-68

1. Введение

Корональные дыры (КД) – это области низкой температуры и плотности на поверхности Солнца. Они имеют однополярное магнитное поле с открытой конфигурацией. Полярные КД всегда видны на полюсах Солнца в момент минимальной солнечной активности. КД наблюдаются на фоне спокойного Солнца как области пониженной интенсивности на сантиметровых длинах волн, если $\lambda > 5$ см [1]. На сантиметровых длинах волн радиоизлучение КД коррелирует 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 ко-

ротких сантиметровых длинах волн. 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 на длинах волн $\lambda = (1.03, 1.38, 2.7, 6.2, 13.0, 30.7)$ см [2]. Пространственное разрешение телескопа (ДНА) составляет минуты дуги. В момент максимальной фазы солнечного затмения (11:17 UT) открытая часть оптического диска Солнца составляла 0, 2 %. Центр диаграммы направленности антенны (ДНА) был смещен на +15 дуговых мин к северу от центра оптического диска Солнца. Поэтому центральная часть ДНА располагалась в северной полярной зоне, где находилась полярная корональная дыра (КД). Это позволило наблюдать полярную корональную дыру над Северным полюсом Солнца.

2. Основные результаты наблюдений

Основная задача «Распределение яркостных температур полярной корональной дыры на Солнце в сантиметровом диапазоне длин волн» выполнялась путем сравнения реальных наблюдений и 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. Были созданы одномерные файлы радиусов и соответствующих яркостных температур для Солнца (Луны). Яркостные температуры модельных колец Солнца (Луны) задавались согласно литературным данным [13], либо подгоняя их методом проб и ошибок, либо решая уравнение переноса [12, 13], либо комбинируя все перечисленные методы. Кроме того, яркостные температуры солнечных колец были рассчитаны также путем решения уравнения переноса с использованием уравнения Баумбаха-Аллена для определения концентрации электронов на заданных расстояниях в солнечной короне.

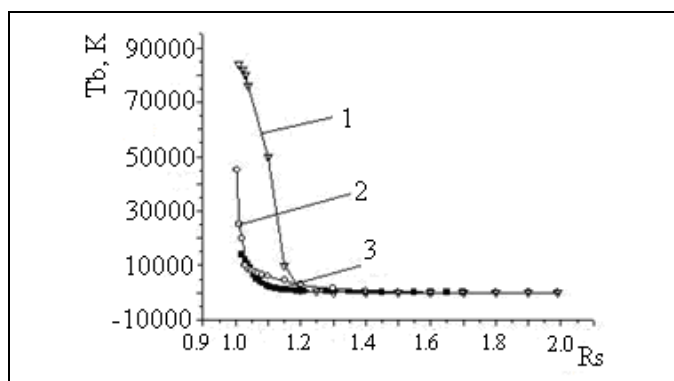


Рис. 1а. Распределение яркостных температур T_b , К по расстоянию от солнечного лимба до $2 R_s$ для КД над Северным полюсом Солнца на длинах волн: 1 – 30.7 см; 2 – 13.0 см; 3 – 6.2 см.

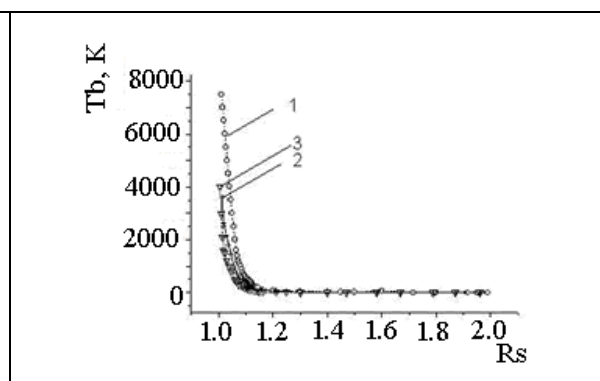


Рис. 1б. Распределение яркостных температур T_b , К по расстоянию от солнечного лимба до $2 R_s$ для КД над Северным полюсом Солнца на длинах волн: 1–2.7 см; 2–1.38 см; 3–1.03 см.

Степень совпадения антенных температур модельных источников с реальной записью радиоизлучения Солнца и Луны во время солнечного затмения 29 марта 2006 года является оценкой качества моделирования.

Основными результатами нашего наблюдения солнечного затмения 29.03.2006 г. являются: 1) полученное распределение яркостных температур полярной корональной дыры на Солнце в сантиметровом диапазоне длин волн; 2) идентичность температурных свойств КД независимо от их расположения на Солнце и организации корональных дыр в период минимальной солнечной активности.

3. Дискуссия

Анализ результатов проводился с использованием наблюдательных и теоретических данных, опубликованных различными авторами. Впервые обнаружено распределение яркостных температур в полярной корональной области Солнца в см-диапазоне длин волн на расстояниях $\sim (1.005-2) R_s$. Резкое снижение яркостной температуры радиоизлучения Солнца на волнах $\lambda = 13.0, 30.7$ см (рис. 1а) наблюдается на интервале расстояний $(1.005-1.03) R_s, (1.01-1.15) R_s$ [3, 4]. Резкого уменьшения яркостных температур радиоизлучения Солнца на коротких длинах волн 1.03, 1.38, 2.7 см на расстояниях примерно от 1.005 R_s до 1.03 R_s не выявлено (рис. 1б).

Анализ полученного распределения яркостных температур полярной корональной дыры в первую очередь проводился с привлечением результатов более ранних наблюдений крупных низкоширотных корональных дыр и спокойного Солнца на РАТАН-600 в стандартном режиме наблюдений в годы спокойного Солнца [1]. Результаты сравнений подтвердили реальную регистрацию полярной корональной дыры над Северным полюсом Солнца 29.03.2006 г. на волнах (6.2, 13.0, 30.7) см и отсутствие видимости КД на волнах 1.03, 1.38, 2.7 см.

Подробное исследование усиления радиоизлучения полярной корональной дыры на коротких радиоволнах было выполнено с использованием микроволновых изображений (17 ГГц), полученных на радиогелиографе Нобейма, магнитограмм и изображений EUV (SOHO) [6, 8–11]. 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. Усиление микроволнового излучения ассоциируется с усилением униполярных элементов потока. Самые темные участки корональной дыры в линии EIT 304 Å соответствуют повышенному радиоизлучению. Авторы обнаружили неоднородность структуры КД в миллиметровом диапазоне. Области повышенного радиоизлучения, как правило, совпадают с темными участками в (EUV SOHO/EIT) диапазоне. Чтобы понять усиление излучения на 17 ГГц вблизи полюсов, 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 частоте 17 ГГц вид-

ны как яркие пятна в районе полюса [10]. Увеличение интенсивности радиоизлучения полярных КД может быть связано с появлением полярных факелов, плюмов, ярких точек и сильных магнитных потоков. Иногда осветление в КД необъяснимо. Основываясь на результатах этих работ, мы предполагаем, что высокие яркостные температуры полярной корональной дыры на волнах (1.03, 1.38, 2.7) см и, как следствие, отсутствие видимости КД на этих волнах может быть вызвано присутствием полярных факелов, плюмов и униполярных магнитных полей вблизи северного полюса Солнца. Shibasaki [11] предположил, что уярчение полярных корональных дыр может быть обусловлено влиянием нагретой атмосферы, которая вытекает вдоль униполярного магнитного поля открытой структуры. Существует ли зависимость яркостных температур КД от их расположения на Солнце и, следовательно, от организации КД? Идентичность характеристик экваториальных и полярных КД была анализирована по данным наблюдений КД в белом свете на коронографе спутника Skylab [7]. Авторы пришли к выводу, что «физические условия внутри корональной дыры не зависят от индивидуальной локализации на Солнце». Результаты наблюдений полного солнечного затмения 29.03.2006 г. на РАТАН-600 в см-диапазоне длин волн подтвердили этот вывод [5].

4. Заключение

Анализ результатов распределения яркостной температуры полярной корональной дыры над Северным полюсом Солнца на расстояниях (1.005–2.0) Rs 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: подтверждено резкое уменьшение яркостных температур радиоизлучения полярной корональной дыры на $\lambda > 6$ см вблизи солнечного лимба; на коротких сантиметровых длинах волн (1,03, 1,38, 2,7 см) полярная корональная дыра не видна; подтверждена идентичность температурных свойств полярной КД и низкоширотных КД независимо от их расположения на Солнце и, следовательно, от их организации в период минимума солнечной активности.

Литература

1. Borovik, V.N. // Lect. Notes Phys. 1994, 432, 185.
2. Golubchina, O.A., Golubchin, G.S. // Astrofiz. Issled., 1981, 14, 125.
3. Golubchina O. et al. // Astrophys. Bull, 2011, 66, 4, 488.
4. Golubchina O.A. & Korzhavin A.N. // Astrophys. Bull., 2013, 68, No.2, 219.
5. Golubchina O.A. // Geomagnetism and Aeronomy, 2017, vol. 57, Issue 8, 964.
6. Gopalswamy N. et al. // Geophysical Research, 1999, vol. 104, No. A5, 9767.
7. Munro R.H. & Jackson B.V. // ApJ. 1977, 213, 874.
8. Pohjolainen, S. // A&A, 2000, 361, 349.
9. Riehkainen, A., Urpo, S., Valtaoja, E. et al. // A&A, 2001, 366, 676.
10. Selhorst C.L. et al. // A&A, 2005, 440, 367.
11. Shibasaki K. // PASJ, 2013, 65, S17.
12. Соболев В.В. Курс теоретической астрофизики. – М.: Наука, 1967.
13. Железняков В.В. Радиоизлучение Солнца и планет. – М.: Наука, 1964.