

УДК 523.947

Идентичность температурных свойств корональной дыры над северным полюсом Солнца 29.03.06 г. и корональных дыр на фоне спокойного Солнца

О.А. Голубчина

Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН,
Пулковское шоссе, д. 65, к. 2, Санкт-Петербург, Россия
golubchina_olga@mail.ru

Поступила в редакцию 1 октября 2016 г.

Аннотация. Статья посвящена анализу температурных характеристик полярной, среднеширотных и низкоширотных корональных дыр на Солнце в сантиметровом диапазоне длин волн в периоды минимальной солнечной активности. В работе использованы данные наблюдений полярной корональной дыры, полученные во время солнечного затмения 29.03.06 г. на РАТАН-600 (Голубчина и др., 2011; Голубчина, Коржавин, 2013, 2014). Данные наблюдений среднеширотных, низкоширотных корональных дыр, а также спокойного Солнца были получены на РАТАН-600 и БПР (Большом Пулковском радиотелескопе) и приведены в работах (Боровик др., 1990; Боровик, 1994). Совпадение ряда температурных характеристик сантиметрового радиоизлучения среднеширотных, низкоширотных корональных дыр и полярной корональной дыры над северным полюсом Солнца свидетельствует об идентичности температурных свойств крупных корональных дыр независимо от способа их организации и места расположения на Солнце в период минимальной солнечной активности.

IDENTITY OF TEMPERATURE CHARACTERISTICS OF THE CORONAL HOLE ABOVE THE SOLAR NORTH POLE ON MARCH 29, 2006 AND CORONAL HOLES ON A BACKGROUND OF THE QUIET SUN, by *O.A. Golubchina*. This paper is devoted to the analysis of temperature characteristics of polar, middle-latitude and low-latitude solar coronal holes at centimeter wavelengths during the periods of solar activity minimum. Observational data of the polar coronal hole have been obtained with the RATAN-600 radio telescope during the solar eclipse of March 29, 2006 (Golubchina et al., 2011; Golubchina, Korzhavin, 2013, 2014). Observational data of the middle-latitude and low-latitude coronal holes, and also quiet Sun have been obtained with RATAN-600 and LPR (Large Pulkovo Radio Telescope) and resulted in works (Borovik et al., 1990; Borovik, 1994). The coincidence of some temperature characteristics of the centimeter radio emission from the middle-latitude and low-latitude coronal holes, and polar coronal hole above the solar north pole testifies to the identity of temperature characteristics of greater coronal holes irrespective of the way of their creation and location on the Sun during the periods of solar activity minimum.

Ключевые слова: солнечная корона, корональная дыра, яркостная температура

1 Введение

Корональные дыры (КД) — области пониженной температуры и плотности на поверхности Солнца. Это униполярные области с открытой конфигурацией магнитного поля. В период минимальной солнечной активности на Солнце преобладает вращательно ориентированная дипольная компонента магнитного поля, поэтому в это время на Солнце всегда присутствуют полярные КД. Вне полярных областей Солнца линии открытого магнитного поля организуют КД либо случайными конвективными движениями в фотосфере, либо пересоединениями силовых линий открытого магнитного поля с замкнутыми силовыми линиями. Одна из последних идей формирования КД представлена в работе (Фиск, Швадрон, 2001).

Для определения идентичности температурных характеристик корональной дыры над северным полюсом Солнца и корональных дыр на фоне спокойного Солнца в период минимальной солнечной активности необходимо было выполнить следующие процедуры:

- 1) определить распределение яркостных температур от лимба Солнца до двух радиусов Солнца по данным наблюдений солнечного затмения 29.03.06 г.;
- 2) полученные результаты сравнить с температурными характеристиками спокойного Солнца и корональных дыр на фоне спокойного Солнца, определенными из более ранних наблюдений.

2 Метод наблюдения солнечного затмения

Наблюдения КД над северным полюсом Солнца были выполнены на РАТАН-600 во время солнечного затмения 29.03.06 г., т. е. в период минимальной солнечной активности. Наблюдения на РАТАН-600 и БПР среднеширотных, низкоширотных КД, спокойного Солнца были проведены ранее также в период минимальной солнечной активности.

Наблюдение КД над северным полюсом Солнца 29.03.06 г. в сантиметровом диапазоне длин волн (1.03, 1.38, 2.7, 6.2, 13, 30.7 см) было выполнено на северо-восточном секторе РАТАН-600 методом “эстафеты” (Голубчина, Голубчин, 1981; Голубчина, 2013) во время максимальной фазы (0.998) солнечного затмения. Для исследования радиоизлучения над северным полюсом Солнца центр диаграммы направленности антенны (ДНА) был смещен по высоте на $\Delta h = + 15$ угл. мин; позиционный угол наблюдения $q = - 28^\circ.50$. Момент максимальной фазы затмения UT = 11 ч 17 мин 0.25 сек λ (см) = (1.03, 1.38, 2.7, 6.2, 13, 30.7); соответствующие размеры горизонтальной (ρ_r) и вертикальной (ρ_v) диаграмм направленности равны:

- ρ_r (угл. мин) = (0.4, 0.6, 1.2, 2.6, 5.7, 13.4);
- ρ_v (угл. мин) = (17.3, 19.3, 19.4, 25.0, 35.8, 84.4).

В центральную часть диаграммы направленности антенны попала корональная дыра полярной области северного полюса Солнца, поскольку центр ДНА был смещен по высоте на + 15 угловых минут относительно центра оптического диска Солнца (рис. 1). Это позволило определить распределение яркостной температуры и электронной концентрации в полярной корональной дыре над северным полюсом Солнца (Голубчина, Коржавин, 2014).

3 Методика обработки наблюдений солнечного затмения 29.03.2006 г.

Подробная методика обработки данных наблюдений приведена в работах (Голубчина и др., 2011; Голубчина, Коржавин, 2013, 2014).

Идентичность температурных свойств корональной дыры...

Основные этапы моделирования:

1. Задание моделей Солнца и Луны в виде систем концентрических колец с равномерным распределением яркости внутри каждого кольца.
2. Расчет координат оптических центров Луны и Солнца на каждую секунду времени наблюдения (всего 300 моментов времени).
3. Расчет горизонтальных и вертикальных диаграмм направленности антенны.
4. Подбор и расчет распределения яркостных температур радиоизлучения Солнца и Луны для заданных длин волн наблюдения.
5. Вычисление антенных температур $T_a(\varphi_0)$ из уравнения антенного сглаживания.
6. Вычисление антенных температур $T_a(\varphi_0)$ с учетом сглаживания горизонтальной ДНА и переоблучения антенны при наблюдении методом “эстафеты”.

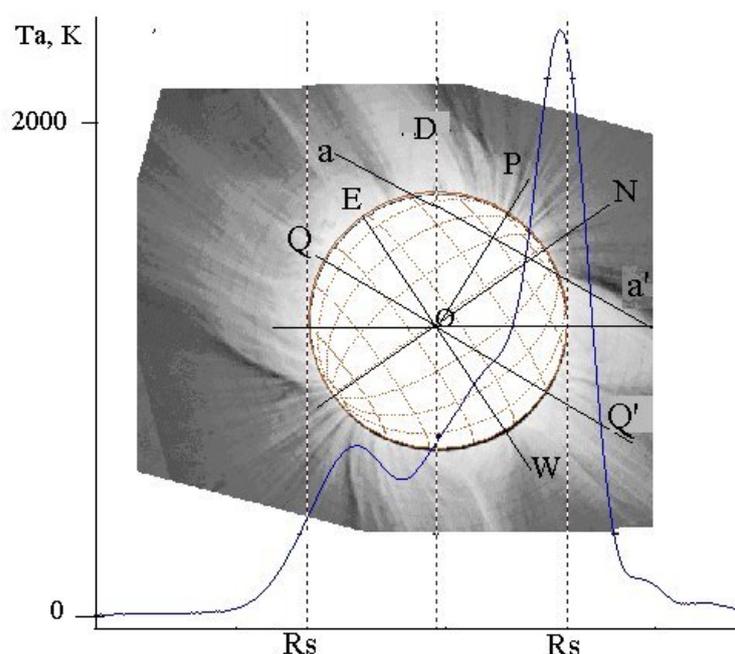


Рис. 1. Наложение сетки Солнца, короны Солнца в белом свете (Региналд и др., 2009) и записи Солнца на волне 13 см во время наблюдения солнечного затмения 29.03.2006 г. на РАТАН-600 (T_a – антенная температура Луны и Солнца, R_s – оптический радиус Солнца).

Проекция небесных осей на диск Солнца: (E–W), (O–N) – направление Восток–Запад, направление на Север Солнца; OQ' – направление небесного экватора, OP – направление на северный полюс Мира; OD – направление ножевой диаграммы направленности радиотелескопа; aa' – проекция суточной параллели

Задача решалась в рамках определенных сферически симметричных математических моделей Солнца и Луны, которые задавались в виде систем концентрических колец с равномерным распределением яркости внутри кольца (одномерные массивы радиусов и соответствующие им яркостные температуры для Луны и Солнца). Яркостные температуры колец моделей Солнца и Луны задавались либо согласно литературным данным, либо подбором, либо расчетным методом, или комбинируя все перечисленные методы. До расстояний примерно $1.5 R_s$ яркостные температуры (T_b) Солнца подбирались, а далее – рассчитывались путем решения уравнения

переноса с использованием уравнения Баумбаха-Аллена для определения электронной концентрации:

$$n_e(r) = 10^8 [1.55 (r/R_s)^{-6} + 2.99(r/R_s)^{-16}], \quad (1)$$

где R_s – радиус оптического диска Солнца, r – расстояние от центра оптического диска Солнца до заданной точки, $n_e(r)$ – электронная концентрация на расстоянии r .

Для Луны использованы данные, приведенные в книге (Железняков, 1964), но на коротких волнах, 1.03 см и 1.38 см, было задано несколько колец с подобранными яркостными температурами.

Для сравнения модельной и наблюдаемой кривых затмения необходимо, согласно яркостным температурам, предлагаемой моделью, вычислить антенные температуры (T_a).

Антенные температуры вычисляются, используя уравнения антенного сглаживания:

$$T_a(\varphi_0) = \int T_b(\varphi) A(\varphi - \varphi_0) d\varphi, \quad (2)$$

где $A(\varphi - \varphi_0)$ – диаграмма направленности антенны, $(\varphi - \varphi_0)$ – угол отклонения от центра ДНА, $T_b(\varphi)$ – распределение яркостной температуры по источнику, $T_a(\varphi_0)$ – антенная температура наблюдаемого источника.

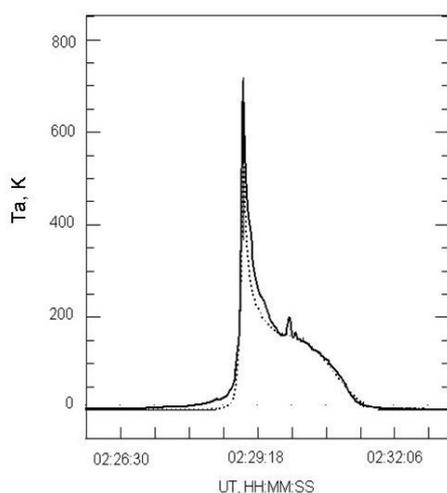


Рис. 2. Модельная кривая – пунктирная линия, сплошная линия – копия записи Солнца и Луны на волне 1.03 см на РАТАН-600 во время максимальной фазы солнечного затмения 29.03.2006 г.

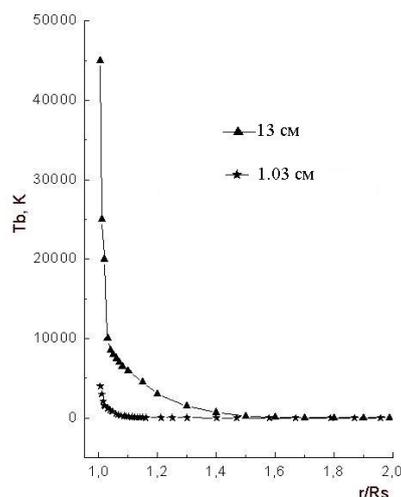


Рис. 3. Распределение яркостной температуры (T_b) радиоизлучения Солнца с расстоянием от солнечного лимба в области северной полярной корональной дыры на волнах 1.03, 13 см

Степень совпадения промоделированных 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. 2).

Идентичность температурных свойств корональной дыры...

4 Анализ результатов наблюдений

По данным наблюдения на РАТАН-600 солнечного затмения 29.03.06 г. и его модельного представления было определено распределение яркостной температуры и электронной концентрации в северной полярной корональной области Солнца на $\lambda = 1.03, 1.38, 2.7, 6.2, 6.3, 13, 30.7$ см на расстояниях от 1-го до 2-х радиусов (Голубчина и др., 2011; Голубчина, Коржавин, 2013, 2014).

Вследствие этого возник вопрос: “Идентичны ли температурные характеристики крупных среднеширотных, низкоширотных и полярных КД в период минимума солнечной активности?”. Для ответа на этот вопрос, как было упомянуто выше, были привлечены результаты наблюдений спокойного Солнца, среднеширотных и низкоширотных КД на фоне спокойного Солнца, которые были исследованы ранее на БПР и РАТАН-600 в период минимума солнечной активности (Боровик и др., 1990; Боровик, 1994).

При наблюдении на РАТАН-600 солнечного затмения 29.03.06 г. обнаружено резкое падение яркостных температур на волнах 6.2 см, 13 см, 30.7 см на интервалах расстояний (1.005–1.03) R_s , что свидетельствует о регистрации наличия КД на этих волнах (рис. 3). Исследование среднеширотных и низкоширотных КД также констатировало регистрацию КД, начиная с волн, больших 6 см (Боровик и др., 1990).

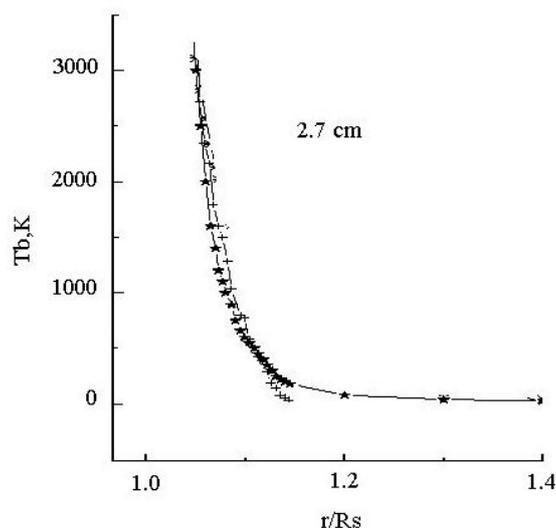


Рис. 4. Распределения яркостных температур атмосферы Солнца с расстоянием от лимба Солнца. Здесь \star — значения T_b , определенные из наблюдений затмения на $\lambda = 2.7$ см; $+$ — данные T_b для спокойного Солнца на волне 2.7 см из работы (Боровик, 1994)

Совпадение распределения яркостных температур спокойного Солнца (Боровик, 1994) и яркостных температур, найденных из наблюдений КД во время солнечного затмения 29.03.06 г. на коротких волнах 1.03, 1.38, 2.7 см (Голубчина, Коржавин, 2013), свидетельствует о том, что на коротких волнах над северным полюсом Солнца КД не видна (рис. 4). Как было установлено ранее на РАТАН-600 и БПР, низкоширотные и среднеширотные КД на фоне спокойного Солнца на коротких волнах радиоизлучения (< 4 см) также не видны (Боровик и др., 1990).

Сравнение средних эмпирически согласованных модельных значений температур для среднеширотных и низкоширотных КД (Боровик и др., 1990) с яркостными температурами вблизи

лимба Солнца, полученными из наблюдений солнечного затмения (Голубчина, Коржавин, 2013), показало их совпадение на близких волнах (табл. 1).

Таблица 1. Яркостные температуры корональных дыр, расположенных вне полярных областей на фоне спокойного Солнца (1) и над северным полюсом полярной области Солнца (2), на близких длинах волн наблюдений

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

Здесь r/Rs – расстояние в долях радиуса Солнца (Rs) ближайшей к лимбу точки измерения во время затмения; $\lambda^{(1)}$ (см) – данные из работы (Боровик и др., 1990), $\lambda^{(2)}$ (см) – результаты наблюдений затмения 29.03.2006 г. на РАТАН-600 (Голубчина, Коржавин, 2013).

Как было замечено выше, механизм образования полярной КД отличается от организации КД вне полярных областей на фоне спокойного Солнца. Тем не менее результаты исследований показали идентичность температурных характеристик КД независимо от места их расположения. Это означает, что в период минимума солнечной активности температурные характеристики КД не зависят от способа организации корональных дыр на Солнце. Идентичность характеристик экваториальных и полярных КД была отмечена в работе (Мунро, Джексон, 1977) по наблюдению КД в белом свете (Skylab).

5 Заключение

Совпадение вышеперечисленных температурных свойств сантиметрового радиоизлучения среднеширотных, низкоширотных КД и КД над северным полюсом Солнца свидетельствует об идентичности температурных свойств КД независимо от места их расположения на Солнце, а следовательно, и от способа организации корональных дыр на Солнце в период минимальной солнечной активности.

Литература

- Боровик (Borovik V.N.) // Lect. Notes Phys. 1994. V. 432. P. 185.
 Боровик В.Н., Курбанов М.С., Лифшиц М.А., Рябов Б.И. // Sov. Astron. 1990. V. 34. N. 5. P. 522.
 Голубчина и др. (Golubchina O., Korzhavin A., Tokhchukova S.) // Astrophys. Bull. 2011. V. 66. N. 4. P. 488.
 Голубчина О.А. // Специальные наблюдения Солнца на радиотелескопах БПР и РАТАН-600. Palmarium Academic Publishing, 2013.
 Голубчина О.А., Голубчин Г.С. // Астрофиз. исслед. 1981. Т. 14. С. 125.
 Голубчина, Коржавин (Golubchina O.A., and Korzhavin A.N.) // Geomagn. Aeronomy. 2013. V. 53. N. 6. P. 1025.
 Голубчина, Коржавин (Golubchina O.A., and Korzhavin A.N.) // Geomagn. Aeronomy. 2014. V. 54. N. 8. P. 1039.
 Железняков В.В. // Радиоизлучение Солнца и планет. Москва: Наука. 1964.
 Мунро, Джексон (Munro R.H., Jackson B.V.) // Astron. J. 1977. V. 213. P. 874.
 Региналд и др. (Reginald, Nelson L., et al.) // Solar Phys. 2009. V. 260. P. 347.
 Фиск, Швадрон (Fisk L.A., and Schwadron N.A.) // Astrophys. J. 2001. V. 560. P. 425.