

КОРОНАЛЬНЫЕ ДЫРЫ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ В
ХРОМОСФЕРЕ

Э.А.БАРАНОВСКИЙ, О.С.ГОПАСЮК, Н.И.ШТЕРЦЕР

Поступила 14 июля 2018

Принята к печати 13 марта 2019

По наблюдениям в линиях HeI 10830 Å и H α исследованы физические условия в полярной корональной дыре. Корональная дыра наблюдалась в северном полушарии с июня 2015г. по март 2017г. Диапазон изменений интенсивностей в корональной дыре в линии HeI 10830 Å составил 1.0046 - 1.0355 и в линии H α - 0.9676 - 0.9753 от интенсивности невозмущенного Солнца. Для объяснения наблюдаемых особенностей проведены вычисления интенсивностей корональной дыры для различных моделей хромосферы. Определены температура и плотность в корональной дыре в виде зависимости этих величин от колонковой плотности в хромосфере. Вычисления проведены на основании расчетов профилей линий HeI 10830 Å и H α с помощью не-TPP программы. На уровне хромосферы температура в корональной дыре ниже на 500 - 1500 К по сравнению с невозмущенной хромосферой, плотность ниже в 2 - 3 раза.

Ключевые слова: *Солнце: хромосфера: корональные дыры: физические условия*

1. *Введение.* Корональные дыры (КД) являются областями самой низкой плотности в солнечной атмосфере. Их низкая плотность и температура по сравнению с внешней короной приводят к уменьшению излучения в ультрафиолете (EUV) и мягком рентгене (SXR). Поэтому в изображениях EUV и SXR они выглядят как темные структуры, их интенсивность в 2-3 раза ниже интенсивности окружающей короны. Кроме того, КД обычно характеризуются большим количеством "открытого" магнитного потока, т.е. магнитного потока, который замыкается на больших расстояниях от Солнца. Открытый магнитный поток КД быстро расширяется над основаниями корональных дыр. На расстоянии 1-10 радиусов Солнца над поверхностью солнечной фотосферы плазма ускоряется вдоль открытых линий магнитного поля с образованием высокоскоростных потоков солнечного ветра, т.е. сверхзвуковых потоков плазмы, которые пересекают нашу солнечную систему (см., например, [1]). Высокоскоростные потоки солнечного ветра являются основной причиной малых и средних геомагнитных бурь на Земле.

В фотосфере и нижней хромосфере КД практически не отличимы от окружающей атмосферы. Температура и плотность в основании КД отличаются от значений окружающей атмосферы незначительно. Как правило, не видно

какого-либо значительного контраста интенсивности между областями КД и окружающей их атмосферы до тех пор, пока температура не превысит $6-7 \cdot 10^5$ К [2]. В верхней хромосфере КД наблюдаются в линии поглощения HeI 10830 Å [3,4]. В этой линии поглощение ослаблено и интенсивность КД повышена на 1-4% по сравнению с окружающей атмосферой. Начиная с высот десятков тысяч километров над уровнем фотосферы, температура в КД становится заметно ниже температуры окружающей короны и составляет порядка $1-1.5 \cdot 10^6$ К. Плотность КД на этих высотах также ниже. Однако существующие оценки расходятся [5].

Число, размеры, гелиографические местоположения КД варьируются в зависимости от фазы цикла солнечной активности [4,6]. Большие полярные дыры наблюдаются примерно в течение 7 лет вблизи солнечного минимума и отсутствуют около 3-4 лет вблизи солнечного максимума. Однако в период снижения активности, вскоре после максимума, можно наблюдать постепенный рост полярных КД полой полярности. Это происходит по мере того, как ряд небольших высокоширотных дыр собираются вместе на полюсах [4,7]. Рост новых полярных КД на фазе спада цикла продолжается примерно в два раза дольше, чем их исчезновение на фазе нарастания следующего максимума [8,9]. По данным 22 и 23 циклов было получено, что полярные КД в течение этого периода развивались первоначально на более низких широтах около 50-60 градусов и распространялись на полюса в течение трех последующих вращений, продолжительность их жизни составила 8.3-8.7 лет [4].

Текущий солнечный цикл открывает эпоху пониженной солнечной активности, когда фоновые и средние значения общего магнитного поля значимо упали [10]. По сравнению с предыдущими циклами произошли изменения магнитных полей всех магнитных структур на Солнце, в том числе, заметное уменьшение величины магнитного поля КД [11], что, с большой вероятностью, ослабило геоэффективность их высокоскоростных потоков. В период минимума 24 цикла активности площадь КД была максимальна, а напряженность и поток магнитного поля оказались минимальными за весь период наблюдений КД [11]. Долгоживущая КД 2015-2017гг. существенно понизила магнитный поток на большом участке Солнца во временном интервале почти полтора года [12].

Однородные эмпирические модели атмосфер спокойного Солнца и КД, построенные на основе данных в радио, оптическом и ультрафиолетовом диапазонах [13], отражают различие температур и плотностей в основании короны. Согласно этим моделям существенное отличие температуры в КД начинается на уровне с $T > 10^5$. По сравнению со спокойным Солнцем на этих высотах в КД градиент температур ниже в 5-6 раз, плотность в основании короны в КД в 2 раза ниже и имеет величину $2.0 \cdot 10^8$ см⁻³. По

данним инструмента Coronal Diagnostic Spectrometer (CDS) [14], установленного на борту SOHO, в период минимума активности 1996-1997гг. значения плотности в КД в основании короны составили $1.8 - 2.5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ [15]. Меньший градиент температур приводит к существованию более широкой переходной области в атмосфере КД, что также подтверждают лимбовые наблюдения.

В настоящей работе мы предлагаем возможный вариант физических условий в хромосфере, которые объясняют наблюдаемые проявления в основании КД, наблюдавшиеся в 2015-2017гг.

2. Данные наблюдений. Нами были использованы данные наблюдений в линии 193 \AA , полученные с помощью космического инструмента Atmospheric Imaging Assembly (AIA) [16], установленного на борту Solar Dynamics Observatory (SDO), данные в линии $\text{H}\alpha$ наземных солнечных обсерваторий, входящих в Global Oscillation Network Group¹ (GONG), и наблюдения в линии $\text{HeI } 10830 \text{ \AA}$, полученные на Башенном солнечном телескопе БСТ-2² Крымской астрофизической обсерватории РАН (КРАО РАН).

SDO/AIA получает изображения полного диска Солнца в UV и EUV длинах волн, соответствующих различным уровням солнечной атмосферы, с пространственным и временным разрешением $0''.6$ пиксель⁻¹ и 12с, соответственно. Для идентификации корональных дыр были использованы изображения в верхних слоях солнечной атмосферы, полученные на SDO/AIA в линии 193 \AA . Из-за их высокого контраста между КД и спокойными областями Солнца эти изображения часто используются для идентификации КД на изображениях EUV с помощью различных методов сегментации (например, [17-22]). В линии 193 \AA наблюдается излучение ионов FeXII в корональной плазме при температуре около $1.6 \cdot 10^6 \text{ K}$. Наземные хромосферные наблюдения в линии нейтрального водорода $\text{H}\alpha$ (6563 \AA), полученные солнечными обсерваториями сети GONG, имеют пространственное разрешение $\sim 1''$ пиксель⁻¹. В КРАО РАН изображения полного диска Солнца в инфракрасной линии $\text{HeI } 10830 \text{ \AA}$, которая образуется в хромосфере и переходной области при температурах $1.0 - 2.5 \cdot 10^4 \text{ K}$, получают с универсальным спектрофотометром БСТ-2 [23]. Участок спектра, покрывающий один кадр ПЗС-камеры, в первом порядке решетки составляет 10 \AA , спектральное разрешение 0.025 \AA . При наблюдении в третьем порядке эти величины равны 3.3 \AA и 0.008 \AA , соответственно. Высота спектра в кадре ПЗС-камеры $64''$ и на 1 пиксель приходится $0''.22$.

Исследования физических условий в основании КД проведены по данным наблюдений полярной КД, существовавшей в северном полушарии 24 кэррингтоновских оборота в июне 2015г. - марте 2017г. В этой работе мы

¹ <https://gong2.nso.edu>

² <http://solar.crao.crimea.ru/eng/observations.htm>

аппроксимировали наблюдения КД, полученные 17.08.2015, 18.05.2016 и 09.07.2016, одновременно в спектральных линиях HeI 10830 Å, H α и 193 Å. Для изображений в линиях HeI 10830 Å и H α проводился учет потемнения диска к краю. Границы КД были определены по изображениям в линии 193 Å с помощью алгоритмов, предложенных в работах [18,24]. Согласно исследованиям [12], разница в площадях КД на уровне хромосферы и короны в выбранные даты составила от 5 до 25%. Границы КД, определенные по наблюдениям интенсивностей в линиях HeI 10830 Å и 193 Å, очень близки как в направлении Восток-Запад, так и в направлении Север-Юг [25]. Это позволило нам перенести границы КД, определенные в линии 193 Å, на изображения в HeI 10830 Å и H α . Изображения Солнца в каждой из линий были приведены к уровню невозмущенного Солнца. Выделение областей спокойного Солнца на изображениях в линии 193 Å было проведено с помощью набора процедур сегментации [19]. Площадь невозмущенных участков, которые были использованы в дальнейшем, примерно соответствовала площади КД. Весь массив данных каждого изображения делился на соответствующее среднее значение интенсивности невозмущенного Солнца. КД на разных этапах эволюции показана на рис.1. Средние относительные интенсивности в каждой линии определялись для участка КД, соответствующего 40° + 43° по широте и

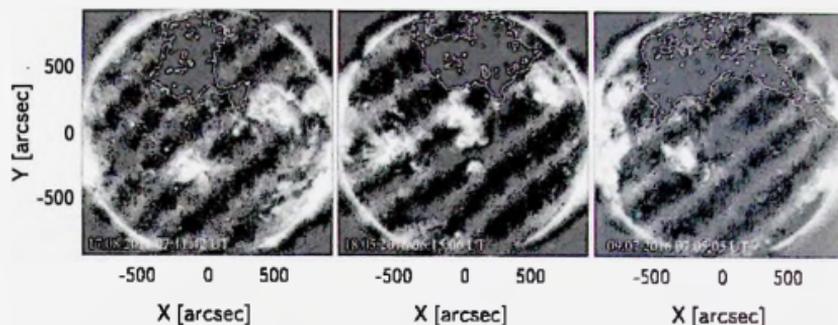


Рис.1. SDO/AIA изображения Солнца в линии 193 Å показывают эволюцию полярной КД в период 17.08.2015-09.07.2016. Сплошными контурами нанесены границы КД.

Таблица 1

СРЕДНИЕ НАБЛЮДАЕМЫЕ ИНТЕНСИВНОСТИ КД

Дата	$I(193)$	$I(\text{HeI})$	$I(\text{H}\alpha)$
17.08.2015	0.3034 ± 0.0085	1.0046 ± 0.0013	0.9753 ± 0.0017
18.05.2016	0.2094 ± 0.0071	1.0355 ± 0.0016	0.9726 ± 0.0008
09.07.2016	0.2146 ± 0.0059	1.0208 ± 0.0026	0.9676 ± 0.0013

-10° и $+10^{\circ}$ по долготе. В табл.1 даны средние интенсивности КД в каждой линии, выраженные в интенсивностях излучения невозмущенного Солнца. Из таблицы видно, что в линиях 193 \AA и $\text{H}\alpha$ интенсивность КД понижена. И если в короне понижение составило 70-80%, то в хромосфере, на высотах образования $\text{H}\alpha$, оно составило всего 2-3%. В то же время в хромосфере на уровне образования $\text{HeI } 10830 \text{ \AA}$ интенсивность КД выше на 1-4%.

3. *Метод вычислений.* Для объяснения наблюдаемых интенсивностей КД в хромосфере были проведены вычисления яркости КД в центре выбранных линий. Увеличение яркости в центре линии означает соответствующее изменение профиля линии. Профили линий вычислялись для различных физических условий в атмосфере Солнца от области температурного минимума до верхней хромосферы. Модель определялась ходом параметров - температуры, плотности, турбулентной и лучевой скоростей, с изменением колонковой плотности. По вычисленным профилям определялась интенсивность в центре линии, которая сравнивалась с наблюдаемым распределением интенсивности в КД. Таким образом, подбирались модели хромосферы, в которых вычисленные интенсивности соответствовали наблюдаемым. Для построения каждой модели использовался набор интенсивностей, полученных одновременно в линиях $\text{H}\alpha$ и $\text{HeI } 10830 \text{ \AA}$.

Построение моделей проводилось по наблюдениям в линиях $\text{H}\alpha$ и $\text{HeI } 10830 \text{ \AA}$ с помощью не-ЛТР программы, алгоритм которой представлен в работе [26]. При расчетах использовалась модель атома водорода с 9 уровнями и модель атома гелия с 11 уровнями. Для корональной дыры была использована обычная схема полубесконечной среды.

Восстановив профили линий по наблюдаемым интенсивностям мы получили температуру, T , и плотность, n_H , в основании КД в хромосфере. На рис.2, 3 представлен ход температуры и плотности в моделях хромосферы, объясняющих наблюдаемые интенсивности КД в линиях $\text{H}\alpha$ и $\text{HeI } 10830 \text{ \AA}$, в зависимости от колонковой плотности в хромосфере. Линия $\text{HeI } 10830 \text{ \AA}$ образуется при значениях колонковой плотности $\log m = -5.8$ - -5.2 г/см^2 , $\text{H}\alpha$ образуется при $\log m = -5.8$ - -2 г/см^2 . Значения $\log m \approx -1 \text{ г/см}^2$ соответствуют уровню температурного минимума. Плотность представлена логарифмом числа атомов водорода. Сплошными кривыми показан ход изменения параметров T и n_H в невозмущенной хромосфере. Штриховыми и пунктирными кривыми показаны изменения параметров при наблюдаемых интенсивностях КД в линиях $\text{H}\alpha$ и $\text{HeI } 10830 \text{ \AA}$, полученных 17.08.2015 и 18.05.2016, соответственно.

Модели характеризуются увеличением температуры в КД с уменьшением колонковой плотности. Диапазон изменения температур в КД составил 4580-8150 К. С уменьшением колонковой плотности (с увеличением высоты в

хромосфере) плотность в КД понижается от $\log n_H = 14.8$ в области температурного минимума до значений $\log n_H = 9.8$ в верхней хромосфере. Как видно из рис.2 температура в корональной дыре ниже по сравнению с невозмущенной хромосферой на 500-1500 К. Самые большие радиации достигаются в верхней хромосфере. Плотность в КД (рис.3) ниже по сравнению с невозмущенной хромосферой в 2-3 раза.

Таким образом, мы получили, что в основании КД температура и плотность

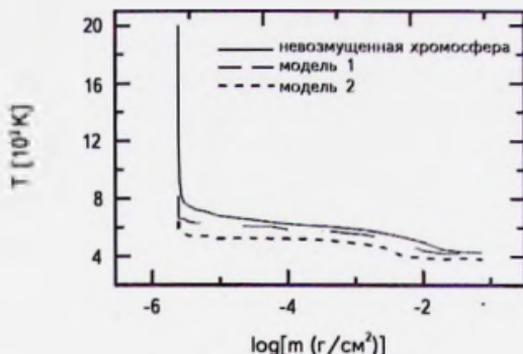


Рис.2. Изменения температуры КД в хромосфере в зависимости от колонковой плотности. Сплошная кривая - ход температуры в невозмущенной хромосфере. Штриховая кривая (модель 1) - изменения температуры в хромосфере при наблюдаемых интенсивностях в КД $I(\text{HeI}) = 1.0046$, $I(\text{H}\alpha) = 0.9753$. Пунктирная кривая (модель 2) - изменения температуры в хромосфере при наблюдаемых интенсивностях в КД $I(\text{HeI}) = 1.0355$, $I(\text{H}\alpha) = 0.9726$.

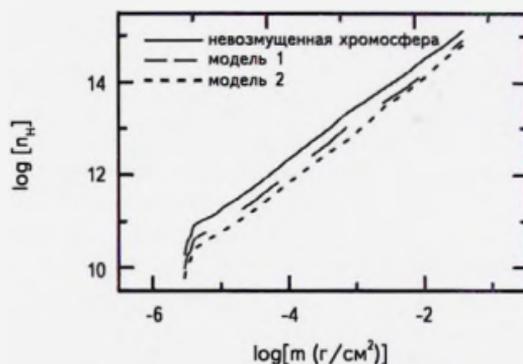


Рис.3. Изменения плотности КД в хромосфере в зависимости от колонковой плотности. Сплошная кривая - ход плотности в невозмущенной хромосфере. Штриховая кривая (модель 1) - изменения плотности в хромосфере при наблюдаемых интенсивностях в КД $I(\text{HeI}) = 1.0046$, $I(\text{H}\alpha) = 0.9753$. Пунктирная кривая (модель 2) - изменения плотности в хромосфере при наблюдаемых интенсивностях в КД $I(\text{HeI}) = 1.0355$, $I(\text{H}\alpha) = 0.9726$.

ниже значений невозмущенной хромосферы по всей хромосфере.

4. *Заключение.* По данным наблюдений в линиях $H\alpha$, HeI 10830 Å и 193 Å проведены исследования физических условий в основании КД на уровне хромосферы. Полярная корональная дыра наблюдалась в северном полушарии в 2015-2017 гг. в течение 24 кэррингтоновских оборотов. Относительные интенсивности КД менялись в пределах 0.2094-0.3034 для линии 193 Å, 1.0046-1.0355 для линии HeI 10830 Å и 0.9676-0.9753 для линии $H\alpha$. Рассчитаны модели хромосферы, объясняющие наблюдаемые особенности КД. Модели построены на основании расчетов профилей линий $H\alpha$ и HeI 10830 Å с помощью не-ЛТР программы. Увеличение температуры и уменьшение плотности в КД происходит с уменьшением колонковой плотности (с увеличением высоты в хромосфере). Различие атмосфер КД и спокойного Солнца происходит уже на уровне верхней фотосферы при $T > 4 \cdot 10^3$ К. Температура корональной дыры на уровне хромосферы ниже на 500-1500 К, чем в невозмущенной хромосфере. Плотность КД ниже по сравнению с невозмущенной хромосферой в 2-3 раза.

SDO является проектом программы NASA Living With a Star. Данные SDO/AIA были предоставлены центром Joint Science Operation Center (JSOC). В этой работе используются данные GONG NSO под управлением AURA в соответствии с соглашением о сотрудничестве с NSF и при дополнительной финансовой поддержке NOAA, NASA и ВВС США.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ и Совета Министров Республики Крым в рамках научного проекта № 17-42-92017.

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, 298409, пгт. Научный, Крым, Россия, e-mail: olg@crasrimea.ru

CORONAL HOLES FROM CHROMOSPHERE OBSERVATIONS

E.A.BARANOVSKII, O.S.GOPASYUK, N.I.SHTERTSER

Based on the HeI 10830 Å and $H\alpha$ lines observations we investigated the physical conditions in the polar coronal hole. The coronal hole was observed in the northern hemisphere from June 2015 to March 2017. The range of intensity variations in the coronal hole in the HeI 10830 Å line was 1.0046 - 1.0355 and in the $H\alpha$ line it was equal to 0.9676 - 0.9753 of the intensity of the undisturbed Sun. To explain the observed features computation of the coronal hole intensities for various models

of the chromosphere have been carried out. The temperature and density in the coronal hole are determined as the dependence of these values on the column density in the chromosphere. Computations were estimated by calculating the profiles of the He I 10830 Å and H α lines for the corresponding models in a non-LTE approximation. At the chromosphere the temperature in the coronal hole is lower by 500-1500 K compared with the unperturbed chromosphere, the density is 2-3 times lower.

Keywords: *Sun: chromosphere: coronal holes: physical conditions*

ЛИТЕРАТУРА

1. J.L.Kohl, G.Noci, S.R.Cranmer et al., *Astron. Astrophys. Rev.*, **13**, 31, 2006.
2. K.Stucki, S.K.Solanki, C.D.Pike et al., *Astron. Astrophys.*, **381**, 653, 2002.
3. J.Harvey, A.S.Krieger, A.F.Timothy et al., *Osserv. Mem. Oss. Astrofis. Arcetri*, **104**, 50, 1975.
4. K.L.Harvey, F.Reclly, *Solar Phys.*, **211**, 31, 2002.
5. S.R.S.Cranmer, *Living Rev. Solar Phys.*, **6**, 3, 2009.
6. Y.-M.Wang, *Space Sci. Rev.*, **144**, 383, 2009.
7. A.F.Timothy, A.S.Krieger, G.S.Vaiana, *Solar Phys.*, **42**, 135, 1975.
8. M.Waldmeier, *Solar Phys.*, **70**, 251, 1981.
9. R.Fisher, D.G.Sime, *Astrophys. J.*, **285**, 354, 1984.
10. V.Ishkov, *Proceedings of the International Conference "Gringauz 100: Plasmas in the Solar System"*, 128, 2018.
11. S.J.Hofmeister, A.Veronig, M.A.Reiss et al., *Astrophys. J.*, **835**, 268, 2017.
12. O.A.Andreeva, Z.S.Akhmetov, V.M.Malashchuk et al., *Geomagnetism and Aeronomy*, **57**, 916, 2018.
13. V.N.Borovik, M.S.Kurbanov, M.A.Ltvshits et al., *Sov. Astron.*, **34**, 522, 1990.
14. R.A.Harrison, E.C.Sawyer, M.K.Carter et al., *Solar Phys.*, **162**, 233, 1995.
15. R.Esser, S.R.Habbal, in: *Cosmic wind and the heliosphere*. Eds. J.R.Jokipii, C.P.Sonetti, M.S.Giampapa, UofA Press, p.297, 1997.
16. J.R.Lemen, A.M.Title, D.J.Akin et al., *Solar Phys.*, **275**, 17, 2012.
17. L.D.Krista, P.T.Gallagher, *Solar Phys.*, **256**, 87, 2009.
18. T.Roiter, A.M.Veronig, M.Temmer et al., *Solar Phys.*, **281**, 793, 2012.
19. C.Verbeek, V.Delouille, B.Mampaey et al., *Astron. Astrophys.*, **561**, A29, 2014.
20. C.Lowder, J.Qiu, R.Leamon et al., *Astrophys. J.*, **783**, 142, 2014.
21. R.M.Caplan, C.Downs, J.A.Linker, *Astrophys. J.*, **823**, 53, 2016.
22. L.E.Boucheron, M.Valluri, R.T.J.McAteer, *Solar Phys.*, **291**, 2353, 2016.
23. N.N.Stepanian, E.V.Dolgoplova, A.I.Elizarov et al., *Bull. of the Crimean Astrophys. Obs.*, **96**, 171, 2000.
24. M.A.Reiss, M.Temmer, A.M.Veronig et al., *Space Weather*, **14**, 495, 2016.
25. O.A.Андреева, В.М.Малачук, Труды конференции "Солнечная и солнечно-земная физика 2018". Санкт-Петербург, 31, 2018.
26. E.H.Avrett, R.Loesser, *SAO, Special Report*, **303**, 1969.