

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 63

АВГУСТ, 2020

ВЫПУСК 3

ФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В КОРОНАЛЬНЫХ ДЫРАХ

О.С.ГОПАСЮК, Э.А.БАРАНОВСКИЙ, В.П.ТАРАЩУК, Н.И.ШТЕРЦЕР

Поступила 19 ноября 2019

Принята к печати 24 июня 2020

Проведено исследование физических условий в хромосфере полярной и экваториальных корональных дыр на фазе спада 24 цикла солнечной активности. На основании наблюдаемых в корональных дырах интенсивностей в линиях HeI 10830 Å и Hα с использованием н-ЛТР программы построены модели хромосферы. Расчеты показали, что температура в экваториальных корональных дырах аналогична температуре полярной корональной дыры. Температура в корональных дырах ниже температуры невозмущенной хромосферы и увеличивается в зависимости от высоты в хромосфере. Различие атмосфер корональных дыр и спокойного Солнца начинается на уровне верхняя фотосфера - нижняя хромосфера.

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

1. *Введение.* Корональные дыры (КД) представляют собой крупномасштабные структуры в солнечной короне. Из-за их значительно более низкой плотности и температуры по сравнению с окружающей короной, КД на изображениях Солнца в рентгене и крайнем ультрафиолете видны как темные области. В основном, силовые линии магнитного поля являются замкнутыми, в спокойном Солнце они имеют вид петлевидных структур, в то время как в КД силовые линии магнитного поля обладают открытой конфигурацией. Открытый магнитный поток быстро расширяется над основанием КД. Плазма ускоряется вдоль открытых линий магнитного поля, образуя высокоскоростные потоки солнечного ветра ($>600 \text{ km s}^{-1}$) [1,2]. КД наблюдаются на всех широтах, от полюсов [3,4] до экватора [5-7]. Исходя из продолжительности жизни и расположения, можно выделить три основные категории КД [8,9]: полярные, неполярные (низкоширотные, изолированные) и транзитентные (корональные димминги), связанные с эруптивными событиями, такими как эruptionя волокон, корональные выбросы массы (например, [8,10,11]). В этом исследовании мы уделили внимание первым двум категориям КД: полярным и экваториальным. Полярные КД располагаются на высоких широтах вблизи полюсов, занимают значительную часть солнечной поверхности и доминируют во время минимума солнечной активности. Время их жизни достигает семи - восьми лет [8,12]. Экваториальные КД обычно редко наблюдаются в минимуме солнечной активности. В это время глобальная магнитная структура Солнца приближенно

представляет собой поле магнитного диполя с открытыми полями противоположной полярности на обоих полюсах и искривленным токовым слоем, наименьшим образом, по сравнению с другими периодами солнечного цикла, удаленным от экватора. Однако имеются и исключения. Так, во время минимума между 22 и 23 циклами, в 1996г., наблюдалась большая КД на низких широтах, простирающаяся от северного полюса до большой активной области в южном полушарии [5]. В течение минимума солнечной активности между циклами 23 и 24, в 2007-2008гг., КД на низких широтах занимали большие площади [6,13]. Несмотря на то, что число солнечных пятен было на исторически низком уровне во время этого минимума, быстрый солнечный ветер из этих КД был настолько сильным, что повлиял на внешний радиационный пояс Земли, вызвал возмущения космической погоды и полярные сияния на высоких широтах [14].

Области спокойного Солнца и КД не различимы по интенсивности изображений, полученных в фотосфере и нижней хромосфере. Температура и плотность в основании КД отличается от значений в окружающей атмосфере незначительно. Наблюдения Coronal Diagnostic Spectrometer (CDS; [15]) на борту Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) показывают, что какого-либо значительного контраста интенсивности между областями КД и окружающей их атмосферой не видно до тех пор, пока температура не превысит $6 \div 7 \cdot 10^5$ К [16]. В верхней хромосфере КД наблюдаются в линии поглощения HeI 10830 Å [9,17]. Поглощение в этой линии ослаблено, поэтому интенсивность КД повышена на 1-4% по сравнению с окружающей атмосферой. Начиная с высоты десятки тысяч километров над уровнем фотосфера, температура и плотность в КД становятся заметно ниже соответствующих значений окружающей короны. Температура КД на этих высотах составляет примерно $1 \div 1.5 \cdot 10^6$ К. Однако существующие оценки расходятся [18].

Однородные эмпирические модели атмосфер спокойного Солнца и КД, построенные на основе данных в радио, оптическом и ультрафиолетовом диапазонах [19], отражают различие температур и плотностей в основании короны. Согласно этим моделям существенное отличие температуры в КД начинается на уровне слоя с температурой, превышающей 10^5 К. 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 данным прибора SOHO/CDS в период минимума активности 1996-1997гг. значения плотности в КД в основании короны составили $1.8 - 2.5 \cdot 10^8$ см⁻³ [20]. Температура и плотность плазмы в КД, полученные при расчете магнитогидростатической модели КД для нижней короны [21] на высотах в несколько десятков Мм, примерно вдвое меньше соответствующих значений на той же высоте в короне, если радиус сечения КД в 1.5 раза

превышает шкалу высот в короне. Температура плазмы КД равна корональной при шкале высот, равной радиусу сечения КД, а эффект потемнения КД обусловлен только понижением плотности плазмы в ней по сравнению с короной. Модели хромосферы полярной КД [22], построенные по данным наблюдений в хромосферных линиях, показывают отличие температуры и плотности КД от значений в невозмущенной атмосфере. Так, по сравнению с невозмущенной хромосферой в КД температура ниже на 500-1500 К, а плотность ниже в 2-3 раза.

В настоящей работе мы провели расчеты физических условий в хромосфере на двух разных широтах, которые могут помочь в объяснении наблюданной картины поведения вещества в основании полярных и экваториальных КД, наблюдавшихся на фазе спада 24 цикла солнечной активности.

2. Данные наблюдений. Также, как и в работе [22], использованы данные одновременных наблюдений КД в линиях FeXII 193 Å, HeI 10830 Å и Hα. Изображения верхних слоев солнечной атмосферы в линии FeXII 193 Å, полученные на Atmospheric Imaging Assembly (AIA; [23]), установленного на борту Solar Dynamic Observatory (SDO), были использованы для отождествления КД. Из-за высокого контраста между КД и спокойными областями Солнца эти данные часто используются для идентификации КД в крайнем ультрафиолете с помощью различных методов сегментации (например, [24-26]). Наземные наблюдения хромосферы в линии нейтрального водорода Hα (6563 Å) были получены в солнечных обсерваториях сети GONG¹. Изображения полного диска Солнца в инфракрасной линии HeI 10830 Å, которая образуется в хромосфере и переходной области, получены в Крымской астрофизической обсерватории РАН на Башенном солнечном телескопе БСТ-2 с универсальным спектрофотометром [27].

В данной работе мы анализировали наблюдения полярной и экваториальных КД (рис.1) во время прохождения ими центрального меридиана. Полярная КД существовала в северном полушарии в 2015-2017 гг. в течение 24 кэррингтоновских оборотов. Подробное исследование вариаций таких ее характеристик, как площадь, интенсивность, напряженность магнитного поля и магнитный поток представлено в работе [28]. Расчет моделей хромосферы этой КД для трех моментов ее эволюции (стадии появления, максимальной фазы развития и стадии близкой к концу) показал, что по всей высоте хромосферы температура и плотность в КД ниже, чем в невозмущенной хромосфере [22]. В настоящем исследовании ряд наблюдательных данных полярной КД был расширен. Экваториальные КД представляли собой сравнительно небольшие изолированные КД, наблюдавшиеся на низких широтах в 2015-2017 гг.

¹ <https://gong2.nso.edu>

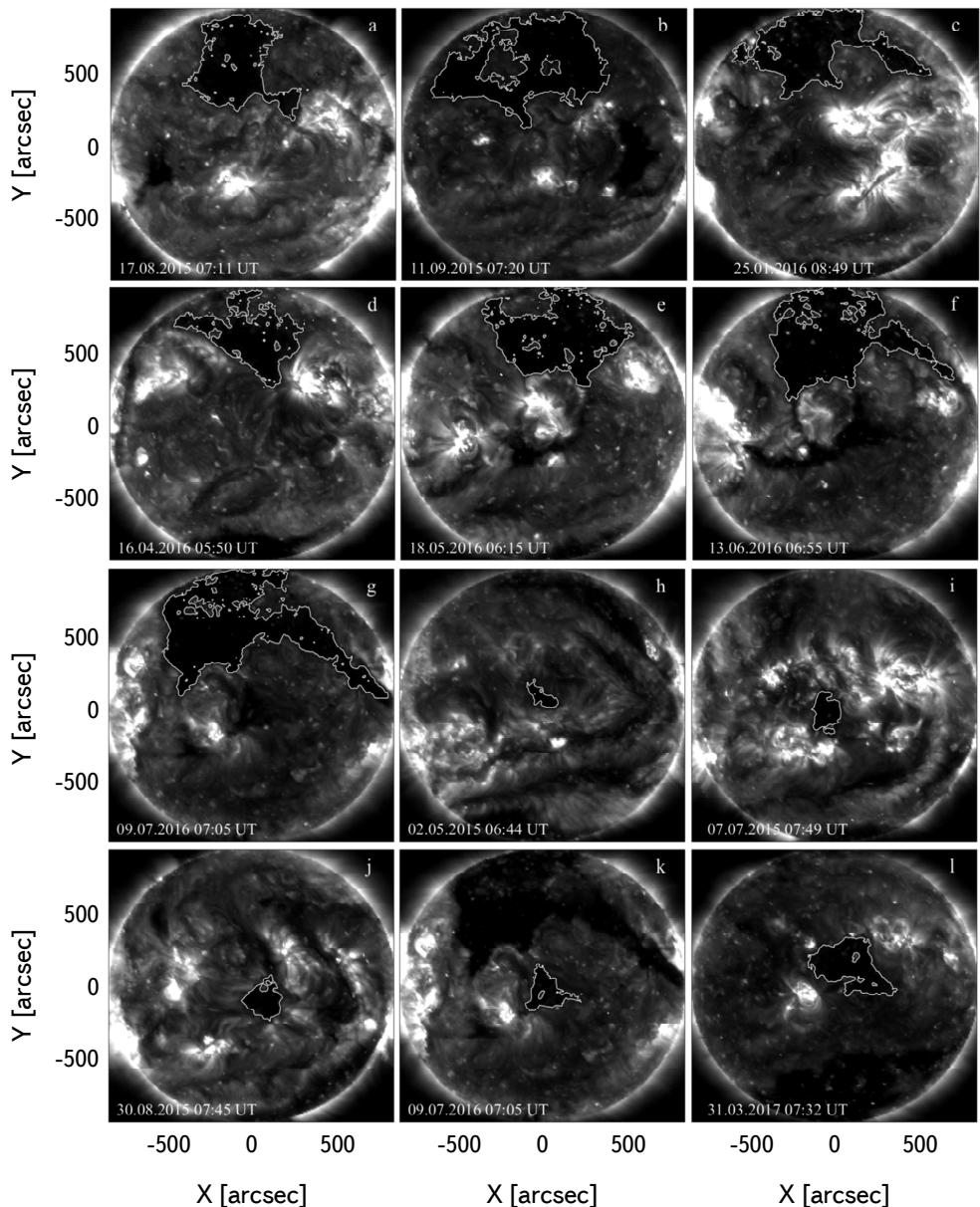


Рис.1. Изображения Солнца в линии FeXII 193 Å. Белыми линиями выделены полярная (a)-(g) и экваториальная (h)-(l) КД для которых проводились исследования.

Для изображений в линиях HeI 10830 Å и Нα были проведены стандартные процедуры учета потемнения диска к краю. Границы КД определялись по изображениям в линии FeXII 193 Å с помощью алгоритма сегментации [25] и затем переносились на изображения в HeI 10830 Å и Нα. Интенсивности

в каждой из линий были приведены к уровню невозмущенного Солнца. Участки невозмущенного Солнца выбирались за пределами КД. Площадь невозмущенных участков примерно соответствовала площади КД. Весь массив данных каждого изображения делился на соответствующее среднее значение интенсивности невозмущенного Солнца. Для полярной КД средние относительные интенсивности в каждой линии определялись для участка КД, находящегося на широте $40^{\circ} \div 43^{\circ}$ и $-10^{\circ} \div 10^{\circ}$ по долготе. Для экваториальных КД средняя интенсивность определялась для участка, расположенного на широте $-5^{\circ} \div 5^{\circ}$ и $-10^{\circ} \div 10^{\circ}$ по долготе. Средние интенсивности полярной (кружки) и экваториальных (треугольники) КД представлены на рис.2. Видно, что по сравнению с невозмущенной хромосферой во всех КД интенсивность в линии $\text{H}\alpha$ понижена на 2%-4%. В то же время на уровне образования $\text{HeI } 10830 \text{ \AA}$ интенсивность КД превышает интенсивность невозмущенной хромосферы на 1%-4%.

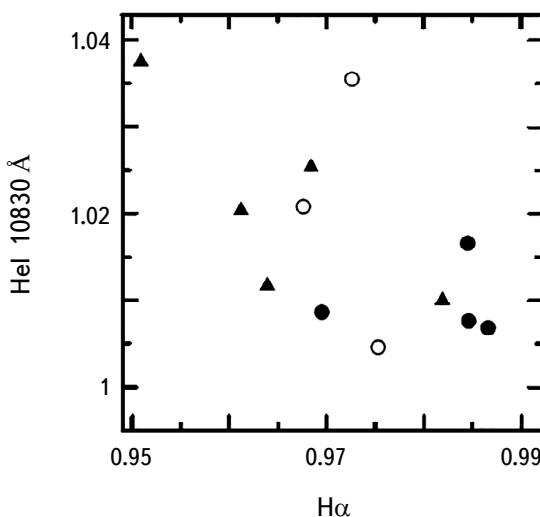


Рис.2. Интенсивности полярной (кружки) и экваториальных (треугольники) КД по измерениям в линиях $\text{H}\alpha$ (ось X) и $\text{HeI } 10830 \text{ \AA}$ (ось Y). Поляные кружки представляют интенсивности полярной КД из работы [20].

3. *Моделирование физических условий КД.* Чтобы объяснить наблюдаемые интенсивности КД в линиях $\text{H}\alpha$ и $\text{HeI } 10830 \text{ \AA}$ были проведены вычисления профилей этих линий для разных моделей хромосферы. Модели задавались ходом температуры, плотности, турбулентной и лучевой скоростей с глубиной в хромосфере. Профили линий вычислялись для различных физических условий в атмосфере Солнца от области температурного минимума до уровня верхней хромосферы. С помощью вычисленных профилей опреде-

лялась интенсивность в центре линии, которая сравнивалась с наблюдаемым распределением интенсивности в КД. Таким образом, подбирались модели хромосферы, в которых вычисленные интенсивности соответствовали наблюдаемым. Полученные таким образом модели являются наиболее надежными.

Вычисление моделей проводилось по данным наблюдений в линиях $\text{H}\alpha$ и HeI 10830 Å с помощью не-ЛТР программы, алгоритм которой представлен в работе [29], и модели для фотосферы и хромосферы (VALC) [30]. В расчетах использовалась модель атома водорода с 9 уровнями и модель атома гелия с 11 уровнями. Для КД была использована обычная схема полубесконечной среды.

Восстановленные с помощью наблюдаемых интенсивностей профили линий позволили получить кинетическую температуру T в основании КД в хромосфере. На рис.3 представлен ход температуры T в хромосфере полярной (рис.3а) и экваториальных (рис.3б) КД в зависимости от изменения колонковой плотности m (количества вещества в столбце с основанием 1 см^2). Сначала рассчитывались модели для невозмущенной хромосферы. Их представляют верхние кривые 1. При вычислениях был задан начальный уровень температуры в невозмущенной хромосфере, от которого велся счет моделей с изменением значений T . Кривые 2 представляют уровень нижней границы значений кинетической температуры T , полученные для полярной (а) и экваториальной (б) КД. Таким образом, рассчитанные модели хромосферы

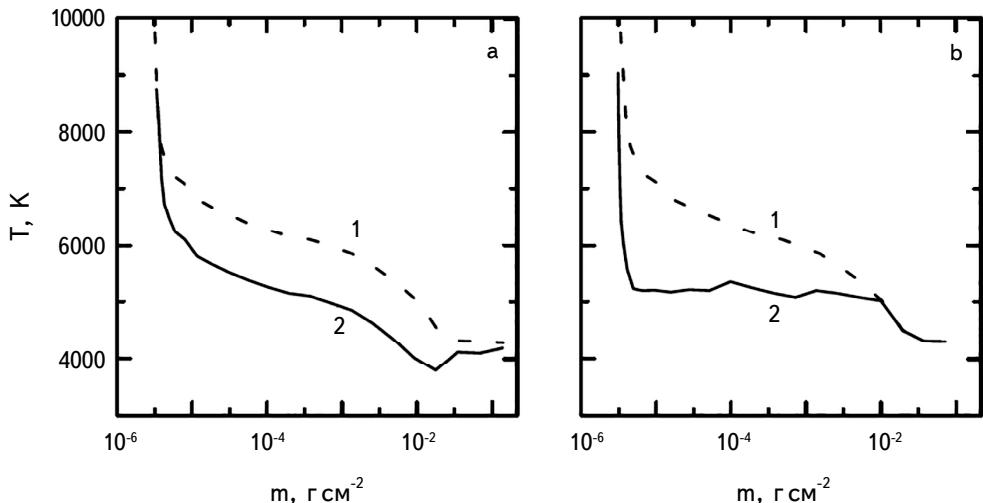


Рис.3. Изменение кинетической температуры T в полярной (а) и экваториальных (б) КД с высотой в хромосфере. Кривая 1 показывает ход T в невозмущенной хромосфере. Кривая 2 показывает полученную из моделей картину изменения T при наблюдаемых интенсивностях КД. Ось абсцисс выражена в единицах колонковой плотности m . Линия HeI 10830 Å образуется при $m = 1.58 \cdot 10^{-6} - 6.31 \cdot 10^{-6} \text{ г см}^{-2}$, линия $\text{H}\alpha$ образуется при $m = 1.58 \cdot 10^{-6} - 0.01 \text{ г см}^{-2}$. Значения колонковой плотности $m = 0.1 \text{ г см}^{-2}$ соответствуют уровню температурного минимума.

дают интенсивности линий, соответствующие наблюдаемым в КД интенсивностям в центре линий $\text{H}\alpha$ и HeI 10830 Å. Анализ моделей показал, что по всей протяженности хромосферы температура как в полярной, так и в экваториальных КД ниже по сравнению с невозмущенной хромосферой и увеличивается с уменьшением колонковой плотности (с увеличением высоты в хромосфере). Диапазон изменений температуры в полярной и экваториальных КД практически идентичен и составил 4000–9000 К. Различия между невозмущенной хромосферой и КД начинаются при температуре ~4500–5000 К. Самые большие различия температуры приходятся на верхнюю хромосферу.

Колонковая плотность в хромосфере растет от уровня образования линии HeI 10830 Å к фотосфере (рис.4). Глубина $h = 0$ км соответствует области образования линии HeI 10830 Å. Кривая 1 показывает ход колонковой плотности невозмущенной хромосферы. Кривая 2 соответствует модельным расчетам в хромосфере экваториальной КД. Линия HeI 10830 Å образуется при значениях колонковой плотности $m = 1.58 \cdot 10^{-6} - 6.31 \cdot 10^{-6} \text{ г см}^{-2}$, $\text{H}\alpha$ образуется при $m = 1.58 \cdot 10^{-6} - 0.01 \text{ г см}^{-2}$. Значения $m \approx 0.1 \text{ г см}^{-2}$ соответствуют уровню температурного минимума.

4. Выводы. При исследовании КД обычно используются данные о внеатмосферных коротковолновых излучениях, и это оставляет без внимания процессы в хромосфере, в основании КД. Наблюдения в линиях $\text{H}\alpha$ и HeI 10830 Å позволили нам определить физические условия в КД на уровне

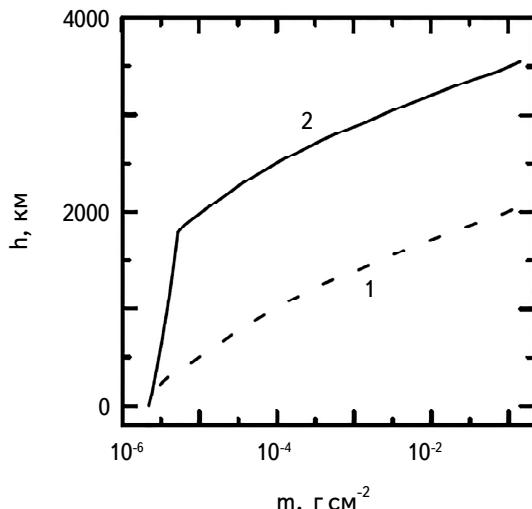


Рис.4. Изменение колонковой плотности m с глубиной h в хромосфере, выраженной в километрах. $h = 0$ км соответствует высоте образования линии HeI 10830 Å. Глубина h растет к фотосфере. Кривая 1 показывает изменения колонковой плотности в невозмущенной хромосфере. Кривая 2 показывает изменения колонковой плотности в экваториальной КД, полученной из серии модельных расчетов.

хромосферы. Полярная и экваториальные КД наблюдались в 2015-2017гг. на фазе спада 24 цикла солнечной активности. Полярная корональная дыра находилась в северном полушарии. За это время ее относительная интенсивность менялась в пределах 1.0046-1.0355 для линии HeI 10830 Å и 0.9676-0.9866 для линии H α . Интенсивность экваториальных КД менялась в пределах 1.0102-1.0377 для линии HeI 10830 Å и 0.9509-0.9819 для линии H α . Рассчитаны модели хромосферы, объясняющие наблюдаемые особенности исследуемых КД. Модели построены в результате расчетов профилей линий H α и HeI 10830 Å с помощью не-ЛТР программы. При расчетах физических условий в КД обоих типов наклон луча зрения к поверхности хромосферы учитывался при решении системы уравнений переноса. Таким образом, в конечном итоге, мы получали вычисляемую модель как функцию оптической глубины. Модели показали, что кинетическая температура в экваториальных КД аналогична кинетической температуре полярной КД и также увеличивается в зависимости от высоты в хромосфере. В обоих случаях различие атмосфер КД и спокойного Солнца отмечено уже на уровне верхняя фотосфера - нижняя хромосфера. Температура КД ниже на 1000-2000 К по сравнению с невозмущенной хромосферой. По данным радионаблюдений [31] и данным SOHO/CDS [32] получено, что корональная температура экваториальных КД аналогична температуре областей полярных КД, что соответствует нашим результатам для хромосферы. Однако, исследования [33] показали, что экваториальный и полярный быстрый солнечный ветер это две отдельные подкатегории быстрого ветра, и эти различия могут быть связаны с особенностями полярных и экваториальных КД, которые в действительности являются двумя отдельными типами регионов, а не одним и тем же типом региона, который наблюдается на разных широтах.

Выборка наблюдений, использованная в настоящей работе, далеко не исчерпывающая: мы выбрали лишь несколько примеров, чтобы определить основные особенности полярных и экваториальных КД на фазе спада солнечного цикла. Более полное и систематическое изучение характеристик и эволюции в течение солнечного цикла этих двух регионов будет дано в следующей работе.

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 BBC США.

PHYSICAL CONDITIONS IN CORONAL HOLES

O.S.GOPASYUK, E.A.BARANOVSII, V.P.TARASHCHUK, N.I.SHTERTSER

The investigation of physical conditions in the chromosphere of polar and equatorial coronal holes observed on the decay phase of the 24 cycle of solar activity was carried out. Based on the HeI 10830 Å and H α lines intensity observed in coronal holes models of the chromosphere with the use of the non-LTR program are constructed. Calculations have shown that the temperature in equatorial coronal holes is similar to the temperature of the polar coronal hole. The temperature in coronal holes is lower than the temperature of the undisturbed chromosphere and increases depending on the height in the chromosphere. The difference between the atmosphere of coronal holes and the quite Sun begins at the level of upper photosphere - lower chromosphere.

Keywords: Sun: chromosphere: coronal holes: physical conditions

ЛИТЕРАТУРА

1. *J.B.Zirker*, Rev. Geophys. Space Phys., **15**, 257, 1977.
2. *S.R.Cranmer*, Space Sci. Rev., **101**, 229, 2002.
3. *A.J.Hundhausen*, in Coronal Holes and High Speed Wind Streams. Ed. J.Zirker, Boulder, CO: Colorado Univ. Press, 225, 1977.
4. *R. von Steiger, T.H.Zurbuchen*, J. Geophys. Res., **116**, A01105, 2011.
5. *B.J.J.Bromage, D.Alexander, A.Breen et al.*, Solar Phys., **193**, 181, 2000.
6. *G. de Toma, S.E.Gibson, B.A.Emery et al.*, in SOHO 23: Understanding a Peculiar Solar Minimum, ASP Conf. Ser., 428, Eds. S.R.Cranmer, J.T.Hoeksema, J.L.Kohl, San Francisco, CA: ASP, 217, 2010.
7. *L.Zhao, L.A.Fisk*, Solar Phys., **274**, 379, 2011.
8. *K.L.Harvey*, in Proc. 8th International Solar Wind Conference, AIP Conf. Ser., 382, Eds. D.Winterhalter et al., Melville, NY: AIP, 9, 1996.
9. *K.L.Harvey, F.Recely*, Solar Phys., **211**, 31, 2002.
10. *L.K.Harra, A.C.Sterling*, Astrophys. J., **561**, L215, 2001.
11. *T.A.Howard, R.A.Harrison*, Solar Phys., **219**, 315, 2004.
12. *M.Waldmeier*, Solar Phys., **70**, 251, 1981.
13. *V.Abramenko, V.Yurchyshyn, J.Linker et al.*, Astrophys. J., **712**, 813, 2010.
14. *S.E.Gibson, J.U.Kozyra, G. de Toma et al.*, J. Geophys. Res. (Space Physics), **114**, A09105, 2009.
15. *R.A.Harrison, E.C.Sawyer, M.K.Carter et al.*, Solar Phys., **162**, 233, 1995.

16. *K.Stucki, S.K.Solanki, C.D.Pike et al.*, Astron. Astrophys., **381**, 653, 2002.
17. *J.Harvey, A.S.Krieger, A.F.Timothy et al.*, Osserv. Mem. Oss. Astrofis. Arcetri, **104**, 50, 1975.
18. *S.R.Cranmer*, Living Rev. Solar Phys., **6**, 3, 2009.
19. *V.N.Borovik, M.S.Kurbanov, M.A.Livshits et al.*, Sov. Astron., **34**, 522, 1990.
20. *R.Esser, S.R.Habbal*, in Cosmic wind and the heliosphere, Eds. J.R.Jokipii, C.P.Sonett, M.S.Giampapa, Tucson: University of Arizona, 297, 1997.
21. *V.N.Obridko, A.A.Solov'ev*, Astron. Rep., **55**, 1144, 2011.
22. *E.A.Baranovskii, O.S.Gopasyuk, N.I.Shtertser*, Astrophysics, **62**, 226, 2019.
23. *J.R.Lemen, A.M.Title, D.J.Akin et al.*, Solar Phys., **275**, 17, 2012.
24. *T.Rotter, A.M.Veronig, M.Temmer et al.*, Solar Phys., **281**, 793, 2012.
25. *M.A.Reiss, M.Temmer, A.M.Veronig et al.*, Space Weather, **14**, 495, 2016.
26. *E.A.Illarionov, A.G.Tlatov*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **481**, 5014, 2018.
27. *Н.Н.Степанян, Е.В.Долгополова, А.И.Елизаров и др.*, Изв. Крым. астрофиз. обс., **96**, 171, 2000.
28. *O.A.Andreeva, Z.S.Akhmetov, V.M.Malashchuk et al.*, Geomagnetism and Aeronomy, **58**, 916, 2018.
29. *E.H.Avrett, R.Loeser*, SAO, Special Report, 303, 1969.
30. *J.E.Vernazza, E.H.Avrett, R.Loeser*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **45**, 635, 1981.
31. *F.Chiuderi Drago, E.Landi, A.Fludra et al.*, Astron. Astrophys., **348**, 261, 1999.
32. *G. Del Zanna, B.J.I.Bromage*, J. Geophys. Res., **104**, A059753, 1999.
33. *L.Zhao, E.Landi*, Astrophys. J., **781**, 110, 2014.