

УДК 523.98

Вариации характеристик корональных дыр в процессе их эволюции

*В.М. Малащук¹, Н.Н. Степанян¹, А.В. Борисенко¹, В.Г. Файнштейн², Г.В. Руденко²,
Я.И. Егоров²*

¹ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым, 298409
natalystepanyan@gmail.com

²Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН, г. Иркутск, Россия, 664033

Поступила в редакцию 1 октября 2016 г.

Аннотация. Исследованы вариации характеристик долгоживущих (время существования несколько месяцев) и короткоживущих (время существования несколько дней) корональных дыр (КД) в процессе их эволюции от возникновения до исчезновения. В работе использованы наблюдения Солнца в линии HeI 1083 нм (КрАО РАН), данные SDO (AIA, канал 19.3 нм, HMI, магнитные измерения) и наблюдения на телескопе SOLIS. Получены следующие результаты.

- Для отдельных КД скорости их возникновения и распада существенно различаются. Для короткоживущих КД время от возникновения до максимума площади может занимать несколько часов. Для долгоживущих КД этот процесс может занимать несколько оборотов Солнца. Изменение яркости КД при их развитии запаздывает по сравнению с изменением площади. Максимум площади наступает раньше, чем минимум яркости. На фоне плавного развития иногда происходит кратковременный рост площади КД за счет ее прироста на границе дыры.
- Открытость силовых линий нельзя считать безусловной характеристикой КД. При рождении корональной дыры в ней возникают замкнутые силовые линии, замыкающиеся в окружающем пространстве на расстоянии 10° – 60° . Открытые силовые линии наиболее полно заполняют КД вблизи максимума развития. При распаде корональной дыры замкнутые силовые линии снова становятся преобладающими. Характерным для силовых линий являются выделенные направления, в которых они распространяются.
- Магнитное поле в КД мало меняется со временем. Так, например, для одной долгоживущей КД среднее за 4 месяца значение модуля продольной составляющей магнитного поля было ≈ 103 Гс. Оказалось, что и другие характеристики магнитного поля в этой дыре (модуль магнитной индукции, радиальная и поперечная компоненты поля, а также угол наклона силовых линий поля к радиальному из центра Солнца направлению) также мало меняются со временем.

VARIATIONS IN CHARACTERISTICS OF CORONAL HOLES IN THE PROCESS OF THEIR EVOLUTION, by *V.M. Malaschuk, N.N. Stepanian, A.V. Borisenko, V.G. Fainshtein, G.V. Rudenko, Ya.I. Egorov*. The variations in characteristics of long-lived (several months) and short-lived (several days) coronal holes (CH) have been studied in the process of their evolution from the origination to extinction. In the paper we used solar observations in the HeI 1083 nm line (CrAO RAS), SDO data

(AIA, channel at 19.3 nm, HMI, magnetic measurements) and observations with the SOLIS telescope. The results are as follows.

- For individual CH the velocities of their origination and decay differ significantly. For the short-lived CH the time from the origination to maximum is about several hours. For the long-lived CH this process can take several rotations of the Sun. The variation in brightness of CH over their development delays compared to variations in the area. The maximum in the area begins earlier than the brightness minimum. Against the background of the development, the short-term growth in the area of CH sometimes occurs on account of its enlargement at the boundary of a coronal hole.
- The openness of lines of force cannot be considered as an undoubted characteristic of CH. At the birth of a coronal hole the closed lines of force occur which enclose in the neighborhood at a distance of 10° – 60° . Open lines of force fill more fully CH near the maximum of development. At the decay of a coronal hole the closed lines of force become predominant again. The indicated directions in which they extend are a characteristic feature of lines of force.
- The magnetic field in CH varies slightly with time. As an example, for one long-lived CH the average over 4 months value of module of the longitudinal magnetic field component was ≈ 103 Gauss. The other magnetic field characteristics (module of magnetic induction, radial and transverse field components and inclination angle of the field lines of force toward the radial from the center of the Sun direction) also proved to vary slightly with time.

Ключевые слова: Солнце, корональные дыры, магнитное поле, эволюция

1 Введение

Корональные дыры (КД) – это структуры солнечной атмосферы, которые в крайнем ультрафиолете и мягком рентгеновском излучении на диске Солнца наблюдаются как участки с пониженной яркостью по сравнению с окружающими областями, а в линии HeI 1083 нм – как образования, на 2–4 % превышающее по яркости невозмущенный диск и имеющее пониженный контраст. Границы между КД и окружающим пространством могут быть резкими, диффузными или, в некоторых случаях, заполненными маленькими петлями. Считается, что КД расположены в области открытых линий крупномасштабного магнитного поля и являются источниками быстрых квазистационарных потоков солнечного ветра. КД на высотах от верхней хромосферы до нижней короны выделяются относительным избытком различных химических элементов. Относительная доля практически всех наблюдаемых в КД на этих высотах элементов близка к измеряемой в фотосфере, в то время как вне КД “работает” FIP-эффект, когда происходит существенное увеличение по сравнению с фотосферой доли элементов с наименьшими значениями первого ионизационного потенциала элемента. Количество, размеры и положения КД меняются в пределах одиннадцатилетнего цикла солнечной активности. Время жизни КД меняется от нескольких суток до нескольких месяцев (см. обзор Кранмер, 2009 и цитируемую там литературу). Измерения свидетельствуют, что КД – области с пониженными плотностью и электронной температурой плазмы (Зиркер, 1977; Уисброу, 1988, Кранмер, 2009). Было обнаружено, что в полярных КД, по наблюдениям над солнечным лимбом, температура тяжелых ионов (O^{+5} , O^{+6}) на расстоянии $R \sim 2 R_{\odot}$ (R_{\odot} – радиус Солнца) примерно на 2 порядка больше температуры протонов (см. обзор Кранмер, 2009). Заметим, что несмотря на преобладание в КД на больших масштабах открытого магнитного поля, на маленьких масштабах в КД наблюдается множество замкнутых силовых линий поля, некоторые из которых отражаются, по-видимому, в

Вариации характеристик корональных дыр...

рентгеновских точках – маленьких областях повышенной яркости, наблюдаемых в КД в рентгеновском диапазоне и в крайнем ультрафиолете.

Эволюция КД включает в себя различные этапы, в том числе периоды возникновения и исчезновения КД, которые связаны с существенной трансформацией магнитного поля в области дыр, размеров и конфигурации дыр (Файнштейн и Руденко, 2004; Уонг и др., 2010). Обнаружено, в частности, что формирование открытого магнитного поля в КД, изменение их размеров и яркости характеризуется различными масштабами времени. Наблюдаются также быстрые изменения отдельных участков границ КД, которые связывают с магнитным пересоединением открытых линий поля в дыре с замкнутыми линиями поля в прилегающих к дыре областях Солнца (Калер и др., 2010). Внутри некоторых КД на определенных этапах их эволюции возникают активные области (Степанян и др., 2013).

В настоящей работе приводятся результаты анализа изменений некоторых характеристик корональных дыр в процессе их эволюции. По существу, мы продолжаем серию наших работ, посвященных различным аспектам эволюции корональных дыр: Бугаенко и др., 2004; Житник и др., 2005; Жигалкин и др., 2008; Файнштейн и др., 2010; Малащук и др., 2011; Малащук и др., 2012.

Таблица 1. Список исследованных корональных дыр

№ КД	№ кэррингтоновского оборота, CR	Координаты КД вблизи центра диска			Даты наблюдения
		Дата	l, градусы	b, градусы	
					26.03 – 4.04.2015
1	2162	29.03	0	-10	
2	2163	28.04	-2	+13	26.04 – 20.05.2015
3	2166–2167	11.08	-7	0	08.08 – 15.08.2015
	2168	17.09	-3	0	3.09 – 11.09
	2169	4.10	-2	0	1.10 – 7.10
	2170	31.10	+3	0	26.10 – 3.11
	2171	27.11	Нет КД		
4	2157	20.11.2014	Нет КД		
	2158	18.12	-5	+5	15.12. – 21.12.2014
	2159	14.01.2015	0	+5	11.01 – 18.01.2015
	2160	10.02	-5	+5	7.02 – 14.02
	2161	9.03	0	+5	6.03 – 12.03
	2162	5.04	+5	0	2.04 – 8.04
	2163	2.05	+5	-2	28.04 – 4.05
	2164	29.05	Нет КД		

2 Наблюдательный материал, методы анализа данных

2.1 Наблюдательный материал

В настоящей работе использованы наблюдения Солнца в канале Fe XII 19.3 нм (данные AIA/SDO), а также в линии HeI 1083 нм (телескоп БСТ-2 КрАО РАН). В работе анализировались измерения магнитного поля и лучевых скоростей (данные SDO и SOLIS) по материалам с 15.12.2014 по 04.11.2015. Были отобраны две короткоживущие КД, существовавшие до 8 дней,

и две долгоживущие, наблюдавшиеся 4 и 6 солнечных оборотов. В таблице 1 даны сведения о днях наблюдений и координатах КД – долготе l и широте φ .

2.2 Методы анализа

2.2.1 Интенсивность излучения в корональных дырах

Интенсивность излучения в КД по наблюдениям в линиях 19.3 нм и HeI 1083 нм определялась в относительных единицах следующим образом. Для каждого изображения Солнца в этих линиях строилась гистограмма распределения интенсивности, находился ее максимум, характеризующий среднюю интенсивность невозмущенного диска. Весь массив данных для изображения делился на значение интенсивности в максимуме. Таким образом, все наблюдения представлялись в единицах средней интенсивности на диске. Для наблюдений в линии HeI 1083 нм выполнялась дополнительная операция – учет потемнения диска к краю.

2.2.2 Площади корональных дыр

Для определения площади КД использовался следующий приближенный подход. Изображения Солнца представлялись в гелиографических координатах: широта φ и долгота l . По этим картам определялась площадь КД в квадратных градусах S . Зная размер градуса долготы на экваторе в километрах и широту геометрического центра дыры φ_0 , можно приближенно определить площадь КД в квадратных километрах, умножив площадь в квадратных градусах на $\cos\varphi_0$ и площадь квадратного градуса в квадратных километрах.

Само понятие площади КД достаточно неопределенно. Во-первых, в большинстве случаев у КД нет четких границ. Во-вторых, в каждой КД разброс интенсивностей отдельных точек достаточно велик. Заранее неизвестно, какие интенсивности соответствуют КД, а какие – вкраплениям темных и ярких элементов.

Ранее в работах Маланушенко, Степанян (1996), Степанян, Маланушенко (2001) были определены значения относительных интенсивностей, характерных для КД в линии HeI 1803 нм. Площадь КД определялась как сумма площадей участков, имеющих интенсивность $I > 1.01I_0$, где I_0 – интенсивность невозмущенного диска. В данной работе для площади КД принималась площадь участка, ограниченного изофотой интенсивности $I_0 + (I_0 - I_{CH})/2$, где I_0 – средняя интенсивность невозмущенного диска, I_{CH} – средняя интенсивность в КД. В максимуме развития КД, как правило, $I_{CH} = 1.02$.

2.2.3 Характеристики магнитного поля корональных дыр

Исследование магнитных свойств корональных дыр, каналов волокон и их ближайших окрестностей опиралось на следующие подходы. Во-первых, использовался оригинальный пакет программ, позволяющий рассчитывать характеристики магнитного поля над видимой поверхностью Солнца в промежутке от фотосферы (точнее, от места измерения магнитного поля) до поверхности источника – сферы радиусом $R = 2.5 R_{\odot}$ с центром в центре Солнца. Такие расчеты проводились в рамках потенциального приближения с использованием Vd-технологии (Руденко, 2001), а в качестве исходных данных использовались измерения магнитного поля одним из телескопов SOLIS. Этот пакет позволяет определить в расчетной области ($R = R_{\odot} - 2.5 R_{\odot}$) три компоненты и модуль магнитной индукции, а также построить силовые линии магнитного поля и определить различные параметры силовых линий на различных удалениях от поверхности Солнца. В число таких параметров входят значения компонент и величины магнитной индукции в разных точках силовых линий, длина участков петли от фотосферы до любой точки пет-

Вариации характеристик корональных дыр...

ли, асимметрия петли и др. Можно также оценить углы наклона силовых линий к радиальному из центра Солнца направлению.

Важные характеристики магнитного поля в исследованных областях на Солнце были получены с использованием векторных измерений поля инструментом *Helioseismic Magnetic Imager* (HMI; Шеррер и др., 2012) на борту космического аппарата *Solar Dynamic Observatory* (SDO; Песнел и др., 2012). Размер пикселя регистрирующей матрицы инструмента $\approx 0.5''$, время между кадрами ≈ 12 минут. При этом возникающая в векторных измерениях поля проблема π – неопределенности направления поперечной компоненты поля решалась с помощью метода, предложенного в работе (Руденко и Анфиногентов, 2014) и характеризующегося повышенной скоростью и точностью решения проблемы, а также применимым при больших удалениях от центра солнечного диска.

Для анализа использовались характеристики поля, определенные как в каждом пикселе изображения анализируемой области, так и усредненные в пределах прямоугольников с размером стороны 3–5 угловых секунд и более, в течение времени ≈ 30 –12 часов до возникновения КД и несколько часов после ее возникновения. Анализировались вариации модуля (B), радиальной (B_r) и поперечной (B_t) компоненты магнитной индукции, а также угла наклона α силовых линий поля к радиальному направлению из центра Солнца. Практически величина α находилась из соотношения: $\cos(\alpha) = |B_r|/B$.

$$B_r = B_x X + B_y Y + B_z Z = B \sin \delta \cos(\Psi + 90^\circ) + B \sin \delta \sin(\Psi + 90^\circ) + B \cos \delta. \quad (1)$$

Величина B_r находилась с помощью соотношения (1), включающего измеряемые величины: B , угол δ между направлением поля и лучом зрения и азимут – угол ψ , измеряемый в плоскости неба против часовой стрелки от столбцов CCD-матрицы к поперечной компоненте поля, получающейся при проектировании вектора \mathbf{B} на плоскость неба. Для определения параметров B , δ и ψ в различных участках области эрупций использовались изображения Солнца с этими параметрами, ближайшие по времени к моментам получения изображений Солнца в континууме.

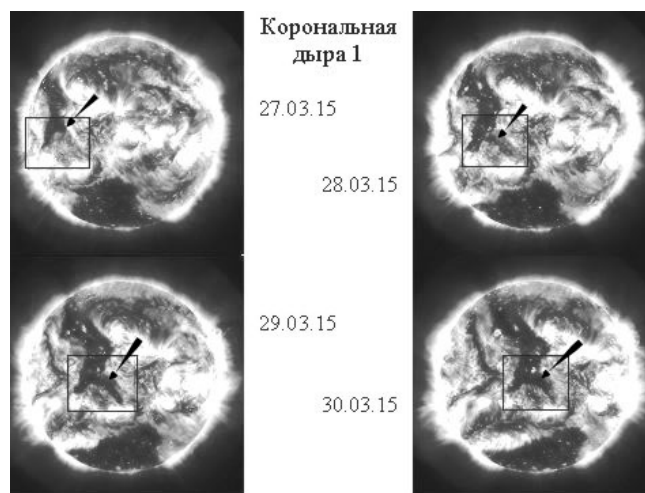


Рис. 1. Корональная дыра 1 (показана стрелкой) в линии 19.3 нм для 4-х моментов времени

Соотношение (1) связывает B_r с компонентами поля в декартовой системе координат (X , Y , Z) с центром в центре солнечного диска, где оси OX , OY располагались в плоскости неба, ось OY была направлена к северному полюсу (углом между плоскостью эклиптики и плоскостью экватора мы пренебрегали). Ось OZ перпендикулярна плоскости неба и направлена к Земле.

Предполагалось, что луч зрения перпендикулярен плоскости неба во всех точках в пределах солнечного диска.

Угол δ между \mathbf{B} и OZ варьируется в диапазоне $[0^\circ; 180^\circ]$, угол ψ (азимут), отсчитываемый в плоскости неба от оси OY против часовой стрелки, меняется в диапазоне $[0^\circ; 360^\circ]$. Поперечная компонента поля находилась из соотношения: $B_t = \sqrt{(B^2 - B_z^2)}$.

При построении временных зависимостей различных параметров магнитного поля в корональных дырах и участках солнечных изображений, связанных с волокнами, дифференциальное вращение Солнца на приведенных в статье солнечных изображениях компенсировалось “перепроецированием” изображений к одному и тому же моменту времени.

3. Анализ материала

3.1 Короткоживущие корональные дыры

3.1.1 Развитие КД 1

Возникновение, развитие и исчезновение КД 1 наблюдалось с 26 марта по 4 апреля 2015 г. в течение кэррингтоновского оборота CR 2162. Координаты ее центра в день максимальной площади даны в таблице 1. Развитие КД 1 показано на рис. 1.

Магнитные силовые линии, выходящие из КД 1 за те же дни, показаны на рис. 2.

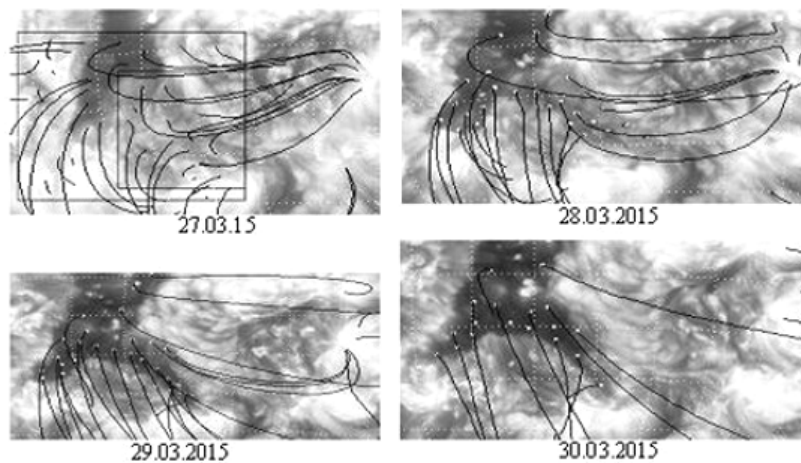


Рис. 2. Магнитные силовые линии (протяженные тонкие черные сплошные линии) в области корональной дыры 1

26.03.2015 из-за восточного лимба вышла цепочка из трех КД. К западу от южной КД на следующий день возникла КД 1. 26.03 из области будущей КД 1 выходят очень короткие силовые линии, замыкающиеся в ней же. 27.03 яркость области возникновения КД 1 стала пониженной в линии 19.3 нм и повышенной в линии HeI 1083 нм. Силовые линии, начинающиеся в КД, стали протяженнее. 29.03 площадь КД 1 достигла максимума. Появляются открытые силовые линии, уходящие с поверхности Солнца. 30.03 почти все силовые линии стали открытыми, уходящими в южном направлении.

В дальнейшем с уменьшением площади КД открытые силовые линии исчезают, а закрытые заканчиваются все ближе к границе уменьшающейся КД. 3.04.2015 КД 1 практически исчезла.

Вариации характеристик корональных дыр...

Для каждого дня наблюдений были определены площади КД 1 и средняя интенсивность в единицах средней интенсивности диска. Они представлены для КД 1 на рис. 3.

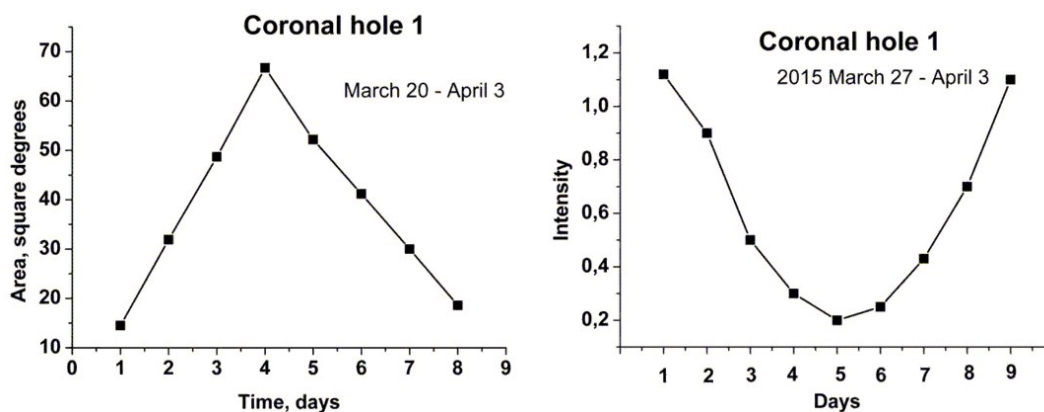


Рис. 3. Изменение площади (левая панель) и яркости корональной дыры 1 (правая панель) со временем. Площадь дана в квадратных градусах и интенсивность в единицах невозмущенного диска в линии 19.3 нм. На аналогичных рисунках ниже площадь дыры и яркость в ней приводятся в тех же единицах

Следует заметить, что максимум площади КД 1 наступил на один день раньше минимума интенсивности.

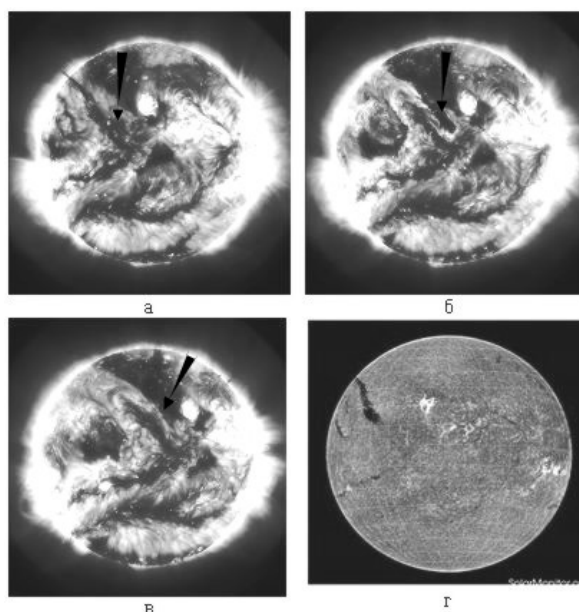


Рис. 4. Развитие КД 2 в канале 19.3 нм (место ее возникновения и сама дыра показаны стрелками). а) 28.04.2015 (13:00), б) 28.04.2015 (20:00), в) 29.04.2015 (20:00), г) диск Солнца в линии H_{α} 27.04.2015

3.1.2 Развитие КД 2

Место возникновения, развития и исчезновения КД 2 наблюдалось с 26 апреля 2015 г. по 1 мая 2015 г. в период кэррингтоновского оборота CR 2163. Координаты ее центра в день максимальной площади даны в таблице 1. Кадры изображений солнечного диска в канале 19.3 нм, полу-

ченные с интервалом 1 час, показали быстрое развитие событий от возникновения до исчезновения КД 2 (рис. 4а, б, в).

27.04.2015 по наблюдениям в канале 19.3 нм к югу от большой корональной дыры в северо-западном квадранте Солнца видно волокно. Это мощное волокно, хорошо видимое в линии H_{α} (рис. 4г). 28.04.15 к северу от западного края волокна возникает малозаметная область пониженной яркости с короткими силовыми линиями, выходящими из нее. Так начинается КД 2. В 13 часов 28.04 к востоку от нее происходит выброс части волокна, сопровождающийся изменением ярких областей между ним и КД и возникновением и резким увеличением площади КД 2 с западной стороны волокна с последующим ее потемнением (рис. 4а, б).

Эти процессы сопровождаются движением КД 2 на север в сторону большой северной КД. К 17 часам площадь КД 2 достигает максимума, а через час становится максимальным потемнение КД 2. После этого КД 2 сдвигается все ближе к северной КД и удаляется от волокна. К 21 часу КД 2 почти полностью поглощается северной КД. Покажем несколько кадров этих динамических событий возникновения КД 2 из наблюдений 28.04.

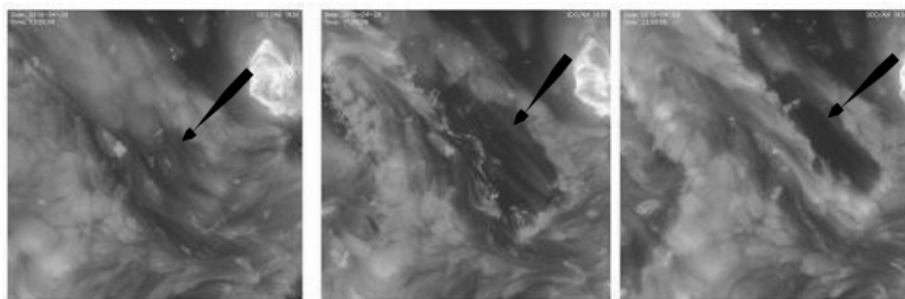


Рис. 5. КД 2 в 13, 17 и 23 часа 28 апреля 2015 г.

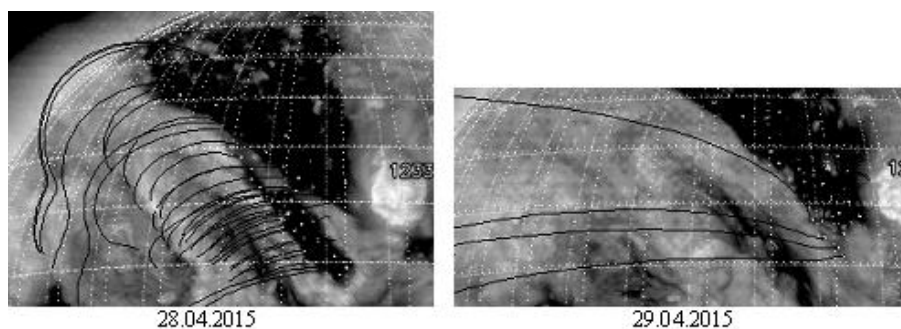


Рис. 6. Магнитные силовые линии, выходящие из КД 2 28 и 29 апреля 2015 г.

3.2 Развитие долгоживущих корональных дыр

3.2.1 Развитие КД 3

КД 3 от возникновения до исчезновения наблюдалась с 8 августа 2015 г. по 3 ноября 2015 г. в кэррингтоновских оборотах CR 2166–2169. Координаты ее центра во всех четырех оборотах даны в таблице 1. Впервые эта дыра наблюдалась 8.08.2015 (CR 2166). В предыдущем обороте в этой области ее не было. Отсюда можно сделать вывод, что КД 3 возникла на обратной стороне Солнца между 25 июля и 7 августа 2015 г. 9 августа уверенно наблюдается резко очерченная КД 3. На рис. 7. показан вид КД 3 во время второго оборота 9 сентября 2015 г.

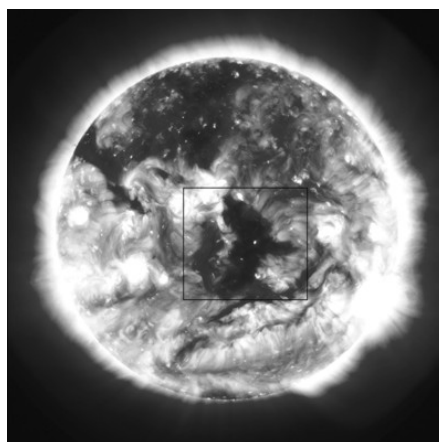


Рис. 7. Корональная дыра 3, наблюдавшаяся 8 сентября 2015 г. вблизи центрального меридиана (дыра обведена прямоугольником)

Рост площади КД 3 продолжается в течение трех оборотов. К концу 4-го оборота КД 3 исчезает. Изменение площади и яркости КД 3 показано на рис. 8.

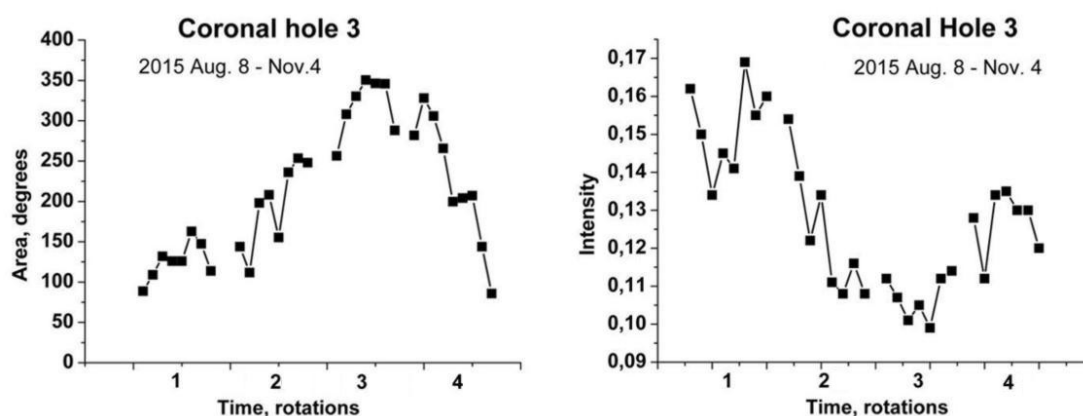


Рис. 8. Изменение площади и яркости КД 3 в течение четырех оборотов

Магнитные силовые линии, выходящие из КД 3, в большинстве своем были открытые. Замкнутые линии наблюдались, в основном, на этапах роста и уменьшения площади КД 3.

3.2.2 Развитие КД 4

КД 4 возникла во время кэррингтоновского оборота 2158 в виде небольшой компактной дыры. Она просуществовала 6 оборотов. На рис. 9 эта дыра показана на изображении Солнца 18 декабря 2014 г.

В первые дни развития КД 4 силовые линии, начинающиеся в ней, замыкались на западе от нее на расстоянии 60° . С каждым днем увеличивалось число открытых силовых линий. Во втором и последующих оборотах практически все силовые линии были открытыми и направленными в виде пучка на север. На рис. 10 представлены силовые линии КД 4 для каждого оборота по одному дню. В случае, когда граница КД 4 была очень резкой, силовые линии, начинающиеся вблизи нее, выходили в виде узкого пучка (см. рис. 10, 10.03.15).

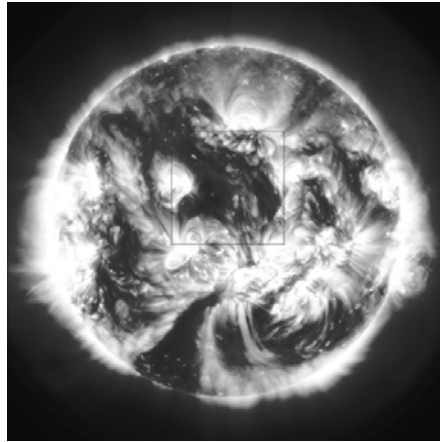


Рис. 9. Корональная дыра 4 18 декабря 2014 г. вблизи центрального меридиана (обведена прямоугольником)

Были измерены площади и интенсивности КД 4. Они представлены на рис. 10

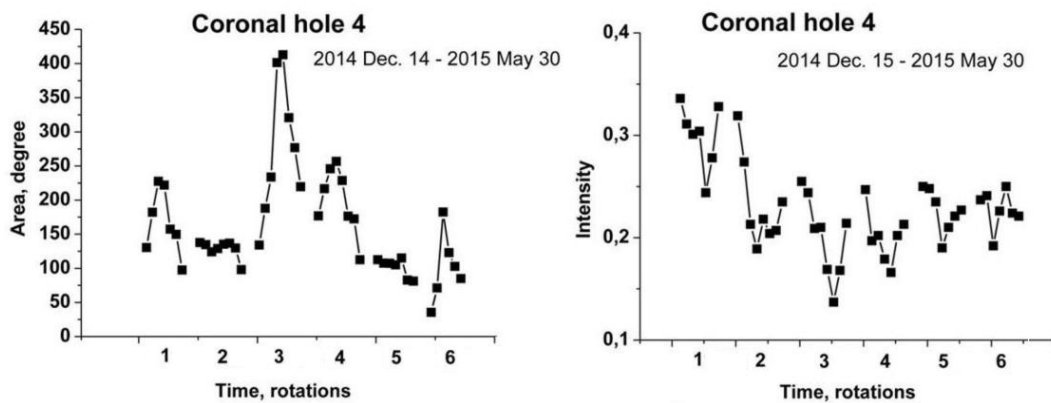


Рис. 10. Изменение площади (левая панель) и яркости (правая панель) КД 4 со временем

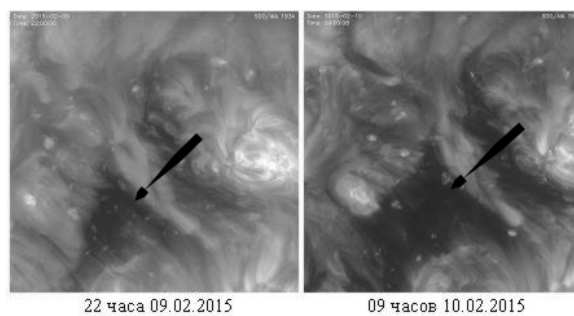


Рис. 11. Изменение яркости и площади КД 4 за 11 часов (изображение в канале 19.3 нм). КД показана стрелкой

Вариации характеристик корональных дыр...

Кратковременное увеличение площади КД 4 9 февраля 2015 г. (на горизонтальной оси на левой панели это время соответствует примерно 25 дням от начала отсчета) связано с появлением новой КД на границе КД 4 (рис. 11). Но при этом уменьшается яркость в центре дыры.

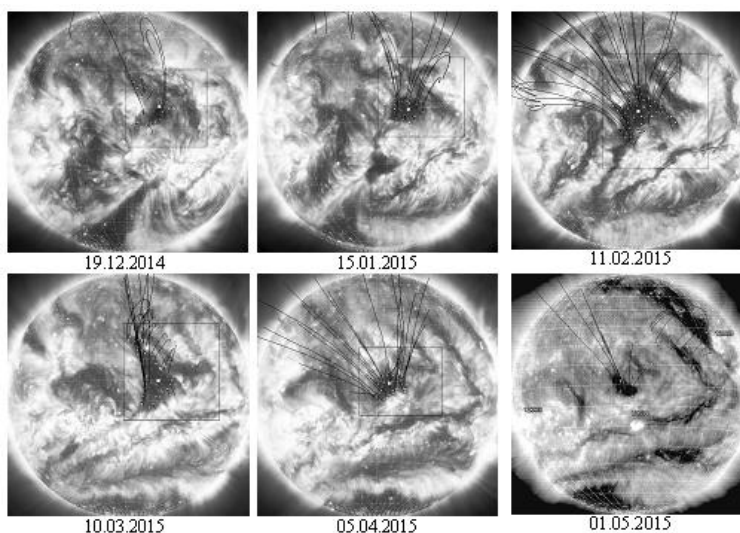


Рис. 12. Силовые линии магнитного поля из КД 4, наблюдающейся в канале 19.3 нм

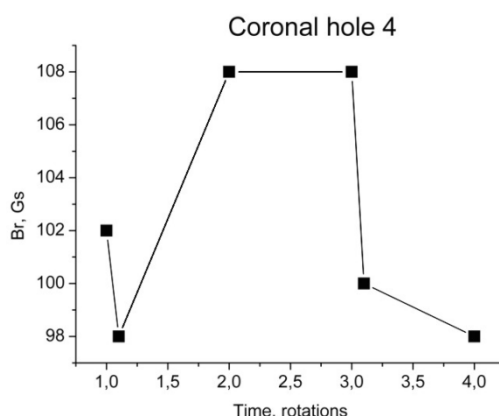


Рис. 13. Изменение $B_z \approx B_r$ в КД 4 с декабря 2014 г. по март 2015 г.

Для КД 4 было найдено изменение со временем нескольких параметров магнитного поля в КД. Начнем с вариаций компоненты магнитного поля по лучу зрения B_z . На рис. 13 показано изменение $B_z \approx B_r$ со временем (с декабря 2014 по май 2015 г.) в КД 4 при ее нахождении вблизи центра солнечного диска. Среднее значение модуля B_z в КД 4 за это время составило 105 ± 3 Гс. Видно, что указанная характеристика поля в КД 4 мало меняется за время ее существования в пределах точности измерения B_z , составляющей десятки Гс. Приводить такие зависимости для дыры, удаленной от центрального меридиана (ЦМ) не имеет смысла, т. к. по мере удаления дыры от ЦМ вклад в B_z будет давать поперечная компонента поля (вблизи лимба B_z примерно равна поперечной компоненте поля) и поэтому обнаруженные возможные вариации поля будет трудно интерпретировать.

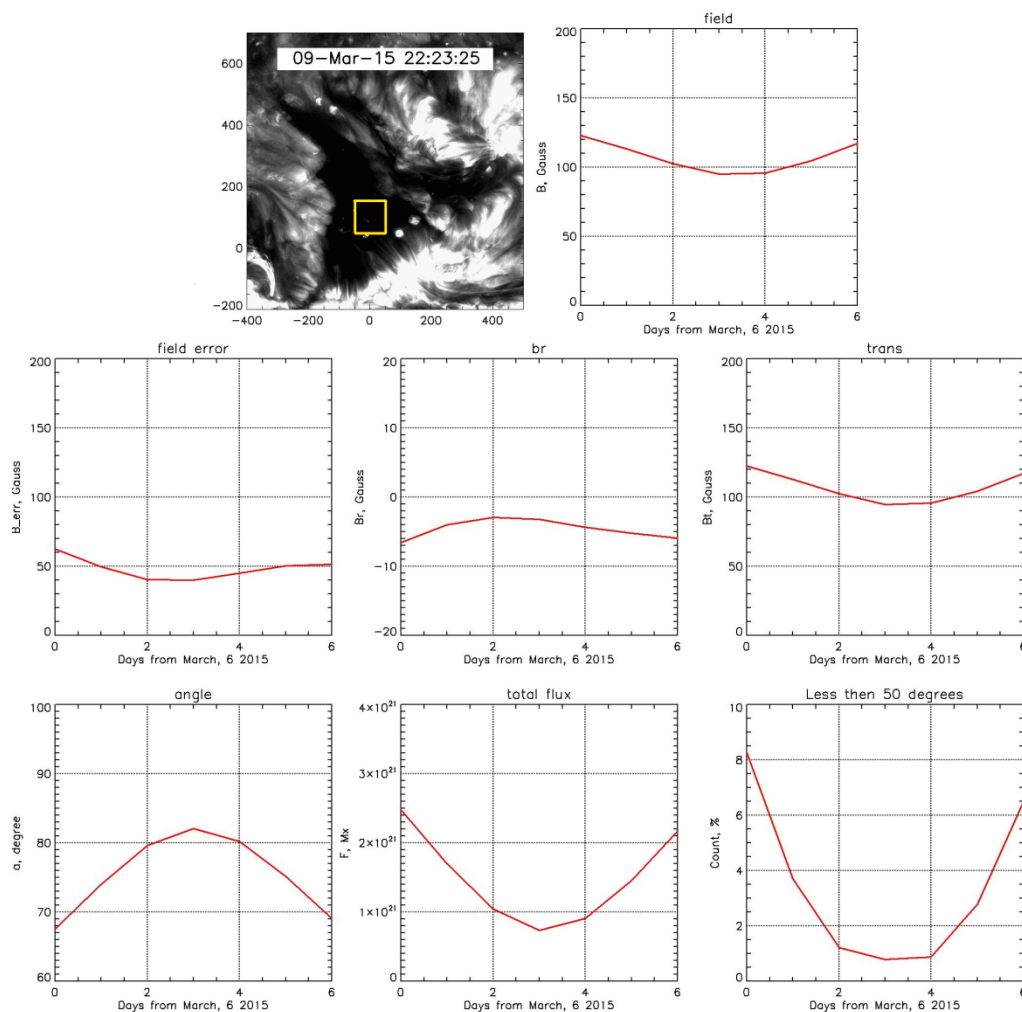


Рис. 14. Характеристики магнитного поля в центре КД 4 для периода 6–12 марта 2015 г.

Верхний ряд панелей: Изображение КД 4 в канале 19.3 нм (слева). Показан квадрат в центре дыры, в пределах которого усредняются параметры магнитного поля. Справа: модуль магнитной индукции B .

Второй и третий ряды панелей, слева направо – изменение со временем с 6 по 12 марта следующих характеристик магнитного поля в квадрате в центре дыры:

Второй ряд: 1) погрешность измерения B ; 2) радиальная компонента магнитной индукции B_r ; 3) поперечная компонента магнитной индукции B_t .

Третий ряд: 1) угол наклона α силовых линий к радиальному направлению из центра Солнца; 2) среднее значение беззнакового магнитного потока; 3) число силовых линий с углом наклона $\alpha \leq 50^\circ$.

Для интервала с 6 по 12 марта 2015 г. с использованием векторных измерений магнитного поля инструментом SDO/HMI было определено несколько параметров поля для участка в центре КД 4. Результаты представлены на рис. 14.

Прокомментируем эти зависимости. Увеличение B при приближении к лимбу связано, скорее всего, с ростом погрешности измерения поля вблизи лимба, которая, в среднем на диске, составляет примерно 50 Гс. Таким образом, с точностью до ошибки измерения величины поля магнитная индукция в центре дыры при ее перемещении от восточного лимба к западному не меняется. Видно, что слабо меняются со временем B_r и B_t . Изменение угла наклона силовых линий поля в пределах примерно 12° при движении дыры от восточного лимба к центру сол-

Вариации характеристик корональных дыр...

нечного диска и далее к западному лимбу, скорее всего, отражает изменение измеряемой величины поля B . С учетом этого можно предположить, что и величина α слабо меняется в КД 4 со временем. В то же время следует обратить внимание, что в среднем угол α составляет примерно 75° , т. е. линии поля, даже будучи открытыми, сильно наклонены у своих оснований к радиальному направлению.

Можно также сделать вывод о слабом изменении в центре КД 4 беззнакового потока магнитного поля, когда для отрицательных компонент поля при расчетах потока магнитного поля используется величина $|Br|$.

Наиболее сильно со временем меняется число силовых линий поля в дыре с углом $\alpha < 50^\circ$: при приближении дыры к лимбам число таких силовых линий возрастает почти на порядок. Это согласуется с уменьшением угла α при нахождении дыры вблизи лимбов по сравнению с ее положением вблизи центра солнечного диска. То, что значительная часть даже открытых линий поля на поверхности Солнца наклонена к радиальному направлению из центра Солнца под большим углом, тесно связано, по-видимому, с наличием в КД по данным с высоким пространственным разрешением большого количества замкнутых ЛРП. Силовые линии, охватывающие ЛРП, должны в этом случае иметь большие углы наклона (непосредственно на ЛРП угол наклона линии поля равен 90°) и остается мало места для открытых линий с маленькими углами наклона. Заметим, что вывод о том, что многие линии поля (открытые или высокие замкнутые) имеют большие углы наклона α , были получены нами также для силовых линий, рассчитанных в рамках потенциального приближения.

4 Заключение

Были исследованы особенности эволюции 4-х корональных дыр от их рождения до исчезновения. Две из этих дыр были короткоживущие (время их жизни не превышало 8 дней), две – долгоживущие со временем существования от 4 до 6 кэррингтоновских оборотов. Основные результаты нашего исследования можно сформулировать следующим образом.

1. Для отдельных КД скорости процессов их возникновения и распада существенно различаются. Для короткоживущих КД время от возникновения до максимума площади может занимать несколько часов. Для долгоживущих КД этот процесс может занимать несколько оборотов Солнца. Изменение яркости КД при их развитии запаздывает по сравнению с изменением площади. Максимум площади наступает раньше, чем минимум яркости. Для короткоживущих КД этот интервал порядка нескольких часов. Для долгоживущих – несколько суток. На фоне плавного развития КД с сохранением четкой формы иногда происходит кратковременный рост площади за счет ее прироста на границе КД. Так, рост площади КД 4 9–10 февраля 2015 г. очень похож на возникновение короткоживущей КД, аналогичной КД 1.
2. Обнаружено, что в корональных дырах одновременно могут существовать области с открытыми и относительно высокими замкнутыми силовыми линиями магнитного поля (замыкающимися вне КД), которые находятся из расчетов поля над поверхностью Солнца в потенциальном приближении. В процессе эволюции корональных дыр площади, занимаемые открытыми и замкнутыми линиями поля, могут меняться. Качественно характер изменения соотношения между открытыми и замкнутыми линиями поля можно описать следующим образом. При рождении КД силовые линии поля в них преимущественно замкнутые. Они выходят из дыры и замыкаются в окружающем пространстве на расстоянии 10° – 60° от границы КД. Внутри КД одновременно наблюдается множество коротких силовых линий, соединяющих мелкие холмы противоположной полярности. С ростом площади и с уменьшением яркости КД силовые линии, выходя-

щие из КД, становятся все длиннее и выше. Вблизи максимума развития КД появляются и открытые силовые линии. В долгоживущих КД открытые силовые линии преобладают на протяжении всей их долгой жизни, хотя замкнутые силовые линии присутствуют на всех этапах развития КД. На последней стадии развития, когда площадь уменьшается, яркость увеличивается и границы становятся диффузными, замкнутые силовые линии, выходящие из КД, преобладают. Характерным для силовых линий как замкнутых, так и открытых, являются выделенные направления, в которых распространяются силовые линии. Замечена особенность в направлениях силовых линий в зависимости от характера границ КД. Как было показано, границы КД бывают как очень резкими, так и диффузными, когда их трудно провести (см. обзор Кранмер, 2009 и цитируемую там литературу). Так, 10.03.2015 в КД 4 открытые силовые линии у восточной резкой границы направлены на север в виде узкого пучка линий. У диффузной западной границы открытые силовые линии направлены тоже на север, но в виде веера (рис. 12).

3. На примере долгоживущей КД 4 было изучено изменение со временем некоторых характеристик магнитного поля в центральной части дыры. Выяснилось, что продольная компонента поля при нахождении дыры вблизи центра солнечного диска слабо меняется со временем в течение 4-х месяцев и составляет в среднем ≈ 103 Гс. По данным векторных измерений поля инструментом SDO/HMI для одного пересечения КД 4 видимой полусферы Солнца (6–12 марта 2015 г.) были проанализированы вариации модуля магнитной индукции B , радиальной B_r и поперечной B_t компоненты поля, а также угла наклона силовых линий поля на поверхности Солнца α . Оказалось, что в пределах погрешности измерения B (примерно 50 Гс) эта характеристика поля не изменяется со временем и, в среднем, составляет 109 Гс. Определение других характеристик магнитного поля также показало их малое изменение со временем в пределах погрешности измерения. B_r оказывается равным примерно -5 Гс, поперечная компонента $B_t \approx 105$ Гс. Погрешность измерения углов α сложнее оценить. Можно сказать, что угол α если и меняется при прохождении дыры по диску Солнца, то в пределах $75^\circ \pm 12^\circ$ (без учета погрешности нахождения α). Мы также подсчитали, как меняется количество силовых линий поля, выходящих из каждого пикселя в дыре (из условия 1 пиксель – 1 линия поля). Оказалось, что число линий поля с $\alpha < 50^\circ$ резко (почти на порядок) возрастает по мере приближения к лимбу. Так как погрешность измерения α нам неизвестна, каких-либо далеко идущих выводов из этого результата мы делать не будем.

Мы благодарим команды SOLIS, AIA, HMI, BBSO за возможность свободного использования данных этих телескопов. Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 15-02-01077-а и № 16-32-00315.

Литература

- Бугаенко О.И., Житник И.А., Игнатъев А.П., Малащук В.М., Степанян Н.Н., Штерцер Н.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2004. Т. 100. С. 123.
- Житник И.А., Жигалкин Р.К., Игнатъев А.П., Малащук В.М., Перебейнос В.А., Степанян Н.Н., Штерцер Н.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2005. Т. 101. С. 128.
- Жигалкин Р.К., Малащук В.М., Степанян Н.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2008. Т. 104. № 1. С. 3.
- Зиркер (Zirker J.B.) // *Rev. of Geophys. and Space Phys.* 1977. V. 15. P. 257.
- Калер и др. (Kahler S., Jibben P., Deluca E.E.) // *Solar Phys.* 2010. V. 262. P. 135.
- Кранмер (Cranmer S.R.) // *Living Rev. Sol. Phys.* 2009. V. 6. N. 3. P. 17.
- Маланушенко, Степанян (Malanushenko E.V., Stepanian N.N.) // *Proc. Solar and Heliospheric Plasma Physics. Thessaloniki. Greece.* 1996. P. 37.

Вариации характеристик корональных дыр...

- Малашук В.М., Руденко Г.В., Степанян Н.Н., Файнштейн В.Г. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2011. Т. 107. № 1. С.89.
- Малашук В.М., Файнштейн В.Г., Степанян Н.Н., Руденко Г.В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2012. Т. 108. № 1. С. 97.
- Песнел и др. (Pesnell W.D., Thompson B.J., Chamberlin P.C.) // Solar Phys. 2012. V. 275. Issue 1–2. P. 3.
- Руденко (Rudenko G.V.) // Solar Phys. 2001. V. 198. P. 5.
- Руденко и Анфиногентов (Rudenko G.V., Anfinogentov S.A.) // Solar Phys. 2014. V. 289. P. 1496.
- Степанян Н.Н., Маланушенко Е.В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2001. Т. 97. С. 76.
- Степанян и др. (Stepanyan N.N., Akhtemov Z.S., Fainshtein V.G., Rudenko G.V.) // Geomagn. Aeronomy. 2013. V. 53. Issue 8. P. 957.
- Уисброу (Withbroe G.L.) // Astrophys. J. 1988. V. 325. P. 442.
- Уонг и др. (Wang Y.-M., Robbrecht E., Rouillard A.P., Sheeley N.R., Thernisien A.F.R.) // Astrophys. J. 2010. V. 715. Issue 1. Article id. 39–50.
- Файнштейн и Руденко (Fainshtein V.G., Rudenko G.V.) // Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity. IAU Symposium / Eds Stepanov A.V., Benevolenskaya E., Kosovichev A.G. UK: Cambridge University Press. 2004. V. 223. P. 379.
- Файнштейн В.Г., Степанян Н.Н., Руденко Г.В. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2010. Т. 106. № 1. С. 7.
- Шерпер и др. (Scherrer P.H., Schou J., Bush R.I., Kosovichev A.G., Bogart R.S., Hoeksema J.T., Liu Y., Duvall T.L., Zhao J., Title A.M., Schrijver C.J., Tarbell T.D., Tomczyk S.) // Solar Phys. 2012. V. 275. Issue 1–2. P. 207.