

УДК 523.945

Гигантская корональная дыра 2015–2017 гг.: II магнитное поле и связь с активными образованиями и вспышками

З.С. Ахтемов, В.А. Перебейнос, Н.И. Штерцер

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым, 298409
azis@crao.crimea.ru

Поступила в редакцию 15 ноября 2017 г.

Аннотация. На основе различных видов наблюдений и пакетов программ проведено исследование гигантской корональной дыры, существовавшей в 2005–2007 гг. Найдено, что напряженность магнитного поля корональной дыры в исследуемый временной интервал уменьшается почти в 20 раз. Поток энергии из корональной дыры растет в начале ее эволюции, а затем убывает, и к концу рассмотренного периода достигает тех же значений, что и в начале. За время существования корональной дыры через нее в короне прошли две области повышенной активности – активные образования. В процессе развития в них возникали концентрические структуры. Кроме того, общим для них было движение с востока на запад в корональной дыре и выход из нее. Это говорит о большей скорости вращения активных образований по сравнению с корональной дырой. Только в двух оборотах, в начале и конце существования корональной дыры, вблизи нее происходили вспышки классов В, С и М.

GIANT CORONAL HOLE OF 2015–2017: II. RELATION BETWEEN MAGNETIC FIELD, ACTIVE SOLAR REGIONS AND FLARES, *by Z.S. Akhtemov, V.A. Perebeynos, N.I. Shtertser*. A giant coronal hole existed in 2015–2017 was investigated on the basis of different types of observations and software packages. The magnetic field strength of the coronal hole was found to decrease by a factor of about 20. The magnetic flux of the coronal hole increases at the beginning of its evolution, after that it decreases and reaches the initial values. Two active centers passed through the coronal hole during its existence. Concentric structures arose in centers in the course of their development. In addition, active centers passed from the east to the west of the coronal hole. This suggests that the rotation speed of active centers is higher compared to the coronal hole. Only in two Carrington rotations, at the beginning and at the end of the coronal hole's existence, В, С and М-class solar flares occurred.

Ключевые слова: Солнце, корональная дыра, магнитное поле, силовые линии, активные образования, мощные вспышки

1 Введение

Корональные дыры (КД) – образования, имеющие самую короткую историю исследования в солнечной физике. Впервые КД были описаны Вальдемайером (1956, 1957), когда он отметил области с пониженной яркостью на изображениях солнечной короны, полученных в видимом свете на коронографе. В 1960–1970 гг. были получены ультрафиолетовые и рентгеновские изображения диска Солнца

с космических телескопов OSO, которые подтвердили существование КД как особых областей с пониженной яркостью излучения солнечного диска.

Корональная дыра, эволюцию которой мы изучали, просуществовала с июня 2015 г. по март 2017 г. Видимо, на фазе спада цикла солнечной активности условия для образования больших корональных дыр оказались благоприятными.

Прямые измерения коронального магнитного поля (МП) пока вызывают трудности. Оценки и выводы о конфигурации МП в короне могут быть сделаны лишь на основании моделирования МП или же экстраполяции фотосферного МП в корону на основании предположений о структуре поля.

В работе Маланушенко (2001) предлагался метод определения нейтральной линии крупномасштабного МП – простое проведение линии между КД и областью противоположной полярности. Нейтральные линии, определенные по положению КД и рассчитанные с помощью моделирования, практически совпадают. Поэтому для проведения границ КД мы использовали изображение магнитного поля Солнца в виде силовых линий, построенных с помощью пакета программ *SolarSoft PFSS*.

Представленная работа посвящена изучению магнитного поля КД и активных образований на разных высотах, а также динамике активных образований (АО) внутри и вне КД в области формирования линии Fe XII 19.3 нм. Кроме того, исследуется пространственное распределение вспышек рентгеновских классов В, С, М, X и положение КД на высоте излучения He I λ 1083 нм.

2 Исходный материал и его обработка

Исходным материалом в настоящей работе послужили следующие данные за период с июня 2015 г. по март 2017 г. (кэррингтоновские обороты CR 2165 – CR 2188):

1. Изображения Солнца в инфракрасной линии He I $\lambda = 1083$ нм, полученные на универсальном спектрофотометре телескопа БСТ-2 КрАО РАН, описание которого дано в работе Степанян и др. (2001). По этим данным строились синоптические карты. На них, кроме изображений в линии He I, отмечались солнечные рентгеновские вспышки класса В, С и М, происшедшие за время соответствующего кэррингтоновского оборота и группы пятен.
2. Данные по рентгеновским вспышкам, взятые с ftp-сервера NOAA¹.
3. Магнитограммы SDO/HMI, выставленные на сайте JSOC².
4. Изображения Солнца в линии 19.3 нм SDO/AIA, взятые с того же сайта.
5. Пакет программ *SolarSoft PFSS* с сайта NASA³, позволяющий построить силовые линии магнитного поля Солнца для высот $1.0 R_{\odot}$ – $2.5 R_{\odot}$ методом потенциального приближения из соответствующих фотосферных магнитограмм.
6. Программа *SolarData Application*, по которой определялась средняя напряженность магнитного поля в контуре КД и среднеквадратичное отклонение напряженности от среднего значения.
7. Пакет программ наблюдений и обработки данных наблюдений на телескопе БСТ-2 КрАО РАН.

3 Изменение напряженности магнитного поля и магнитного потока в корональной дыре

В первой части этой работы (Андреева и др., 2018) было показано, что границы КД, определяемые по изображениям Солнца в линии 19.3 нм, хорошо совпадают с границами между открытым магнитным полем КД и окружающими ее высокими петлями биполярного магнитного поля, полученными по рисункам силовых линий программой *SolarSoft PFSS*.

По магнитограммам SDO/HMI для дней, когда КД проходит через нулевой меридиан, нами строились силовые линии магнитного поля для уровня фотосферы и определялись контуры КД по границе между ней и областями противоположной полярности. Примеры изображений диска Солнца с

¹ ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/swpc_products/daily_reports/solar_event_reports/

² http://jsoc.stanford.edu/How_to_get_data.html

³ https://hesperia.gsfc.nasa.gov/hessi/solar_install/installation.html

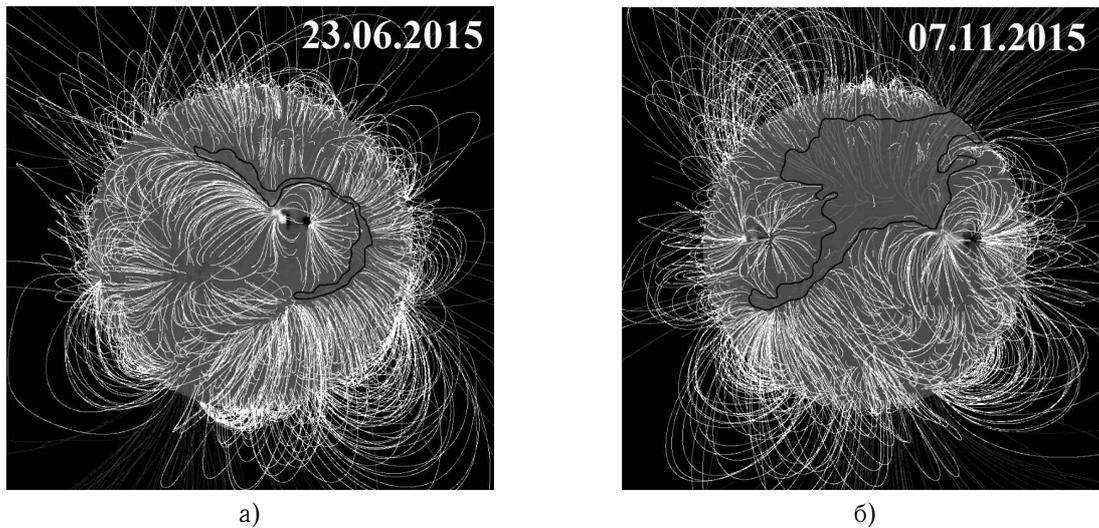


Рис. 1. Контуры КД и силовые линии магнитного поля на уровне фотосферы. Рядом с КД наблюдаются биполярные АО; рисунок а) относится к обороту 2165, б) – к обороту 2170

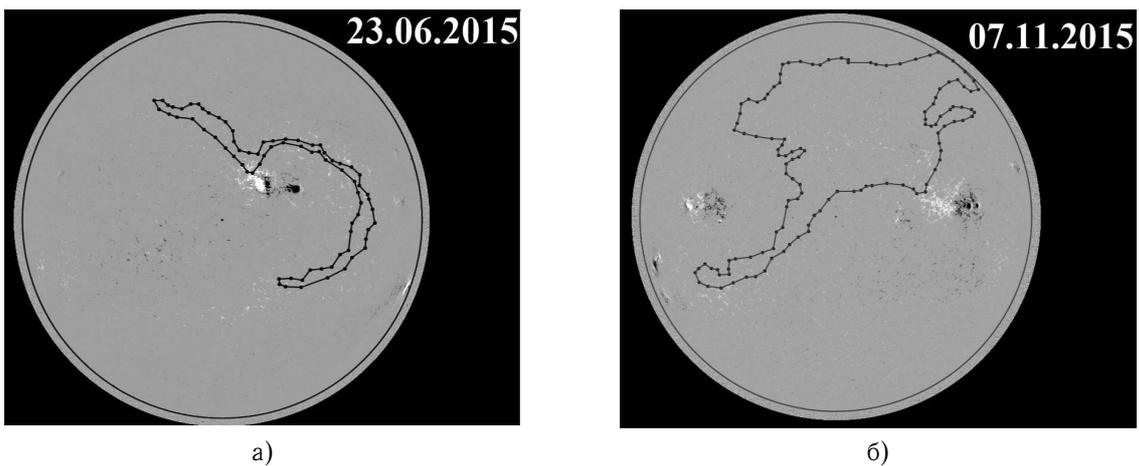


Рис. 2. Контуры КД, перенесенные на соответствующие магнитограммы SDO/HMI, в кэррингтоновских оборотах: а) 2165 и б) 2170

обозначенной КД показаны на рис. 1. Полученные контуры КД с помощью программы *Solar Data Application* переносились на магнитограмму SDO/HMI (рис. 2) и определялась средняя напряженность магнитного поля в ней на уровне фотосферы (рис. 3а). Изменения магнитного потока через КД представлены в графическом виде на рис. 3б.

Величина напряженности магнитного поля B_{θ} за время существования КД с момента ее возникновения уменьшается в 19 раз. Два интервала повышения средней напряженности на фоне общего спада наступают сразу после роста площади и их можно связать с выходом к КД двух больших активных образований.

Максимальное значение магнитного потока $10.5 \cdot 10^{21}$ Мх в обороте CR 2174. Поток энергии из КД растет с оборота 2167 до оборота 2174, а затем убывает, и к обороту 2188 достигает тех значений, что и в обороте 2167.

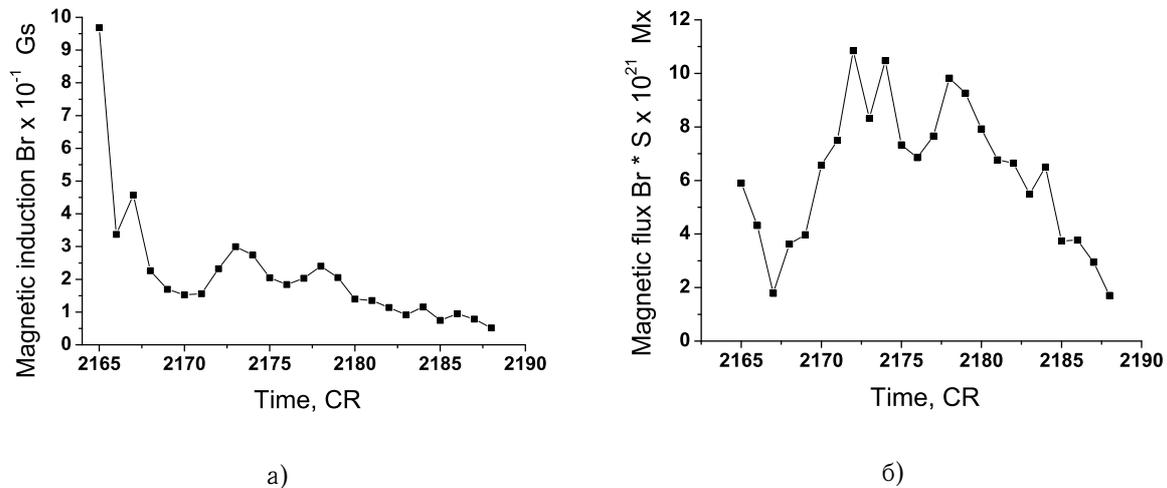


Рис. 3. а) вариации средней напряженности магнитного поля КД (индукция магнитного поля в Gs), б) изменения магнитного потока в КД со временем (магнитный поток в Mx)

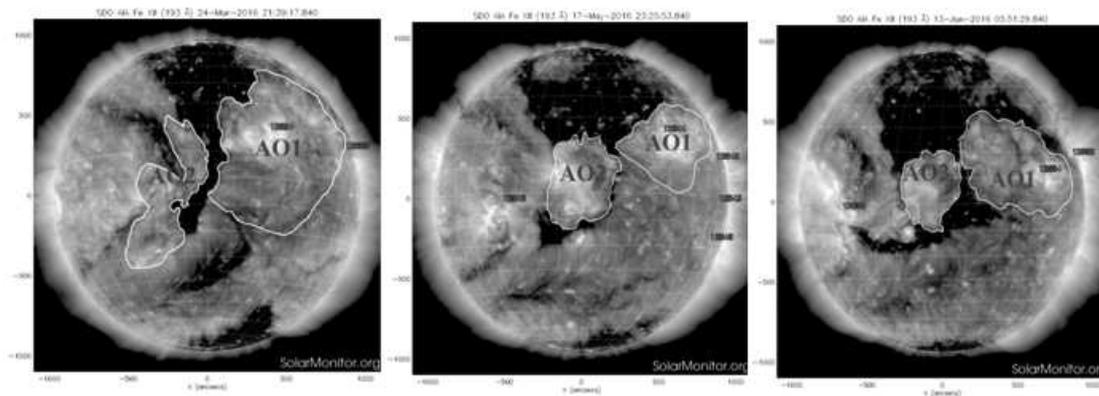


Рис. 4. Выход AO1 из КД и возникновение AO2. Первый слева диск Солнца – CR 2175 (24 марта 2016 г.), второй – CR 2177 (17 мая 2016 г.), третий – CR 2178 (13 июня 2016 г.)

4 Развитие двух активных образований, связанных с гигантской корональной дырой

За время существования КД через нее прошли две области повышенной активности в короне – AO1 и AO2 (рис. 5). 10 октября 2015 г. AO1 находилось в юго-восточной части КД в интервале широт от -10 до $+30$ градусов. 5 декабря оно уже занимает значительную часть КД. В январе 2016 г. AO1 находится уже в центре КД. В июне – июле 2016 г. AO1 покидает КД, выйдя за ее западную границу. За время прохождения AO1 через КД размеры по широте были в пределах 40 – 50 градусов, а по долготе менялись от 30 до 60 градусов.

С марта 2016 г. с востока от КД возникает второе АО (AO2) (рис. 5, слева). Сначала это светлая полоса, параллельная восточной границе КД. В южной части этой структуры видно расширенное и более яркое образование. За май и июнь AO2 полностью вошло в КД (рис. 5, справа). В сентябре 2016 г. форма AO2 изменилась: появились кольцевые структуры. В октябре – ноябре 2016 г. AO2 покидает КД, выйдя за ее западную границу.

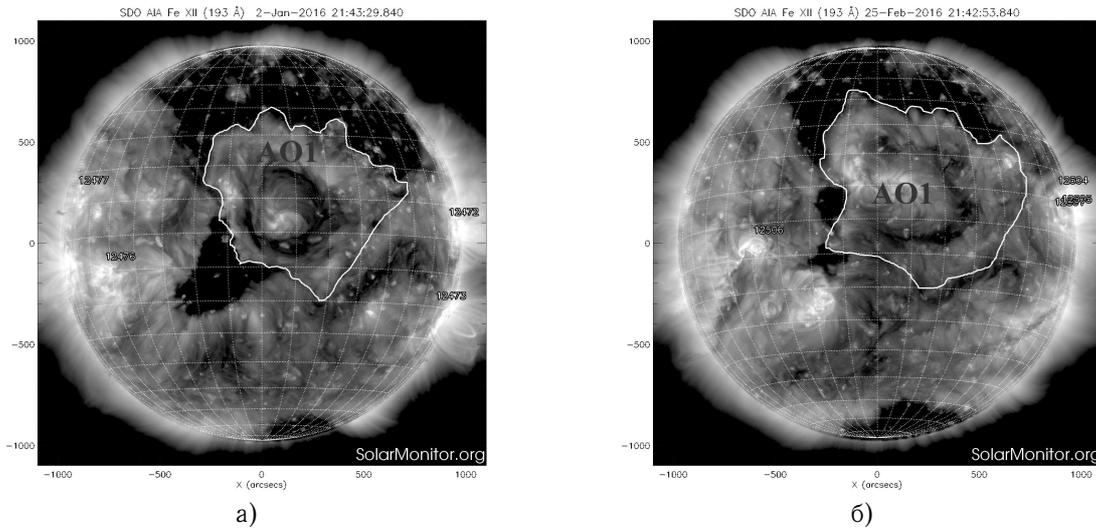


Рис. 5. Концентрические структуры на AO1. а) CR 2172 (2 января 2016 г.), б) CR 2174 (25 февраля 2016 г.)

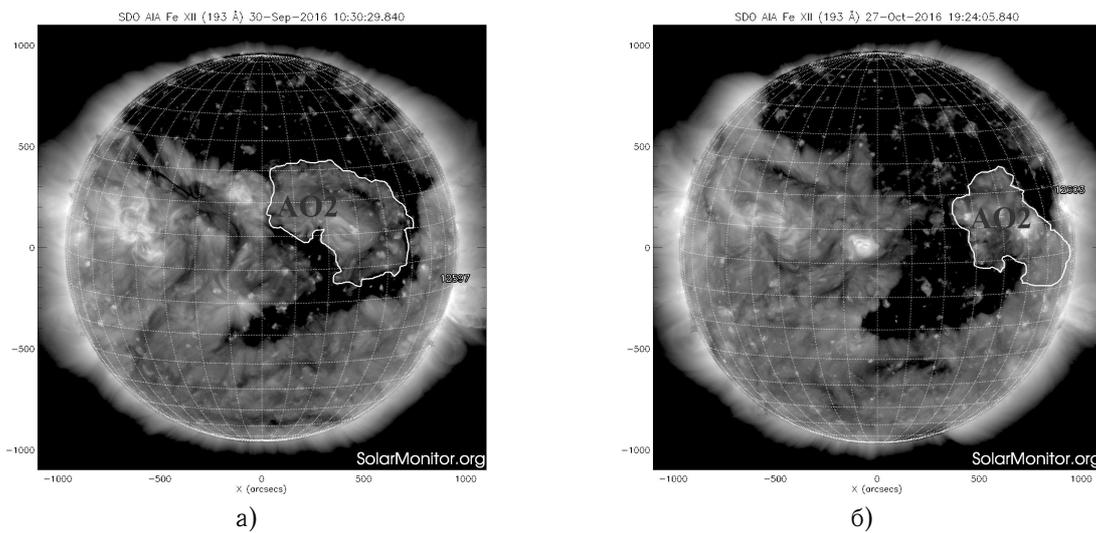


Рис. 6. Концентрические структуры на AO2. а) CR 2182 (30 сентября 2016 г.), б) CR 2183 (27 октября 2016 г.)

AO1 и AO2 возникли как аморфное образование вблизи КД. Со временем, в процессе развития, в них возникают спиральные, а затем и концентрические структуры из ярких и темных колец (рис. 6 и рис. 7).

То, что оба АО в процессе своей эволюции двигались с востока на запад внутри КД и вышли из нее, говорит о разных скоростях вращения АО и КД (Зельк и др., 2009), т. е. АО вращались быстрее, чем КД. Это свидетельствует о том, что уровень, на котором находится источник КД, отличается от расположения источника АО.

5 Корональная дыра и рентгеновские вспышки

Для изучения связи между рентгеновскими вспышками и КД 2015–2017 гг. мы использовали синоптические карты, построенные по наблюдениям в КраО РАН групп пятен в белом свете и спек-

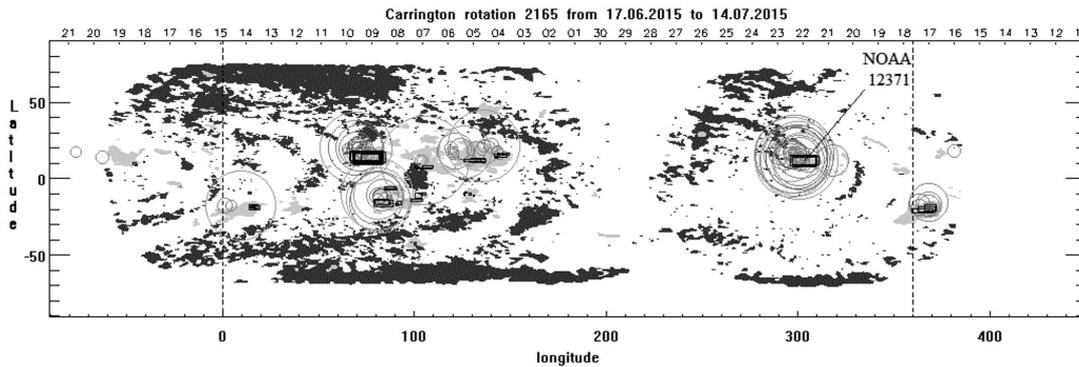


Рис. 7. Синоптическая карта распределения интенсивности линии He I 1083 нм по диску Солнца с нанесенными на нее вспышками – CR 2165. На карте указано также положение групп пятен в виде черных прямоугольников

тральным наблюдениям в линии гелия 1083 нм. На синоптические карты были нанесены данные по рентгеновским вспышкам в виде окружностей (колец) разной яркости и радиуса. Размер радиуса кольца свидетельствует о балле вспышки, а яркость – о классе.

Вспышки класса А и Х вблизи исследуемой КД в оборотах CR 2165–CR 2188 не наблюдались, а вспышки классов В, С и М происходили вблизи границ КД на широте 20° – 30° и в диапазоне долгот $L = 260^{\circ}$ – 300° в оборотах CR 2165 и CR 2180 (рис. 7). На других оборотах вспышки класса С и М отмечены не были.

6 Результаты и выводы

- За время существования КД через нее прошли две области повышенной активности, два активных образования – АО1 и АО2. В процессе развития АО в них возникали концентрические структуры. Кроме того, общим для них было движение с востока на запад КД и выход за ее пределы. Это говорит о большей скорости вращения АО по сравнению с КД.
- Только в двух оборотах вблизи КД происходили относительно сильные вспышки. Это обороты CR 2165 и CR 2180 и вспышки класса С и М.
- Исследуемая гигантская КД существенно понизила напряженность магнитного поля на большом участке Солнца во временном интервале почти полтора года. О малом выходе магнитного поля из глубоких слоев Солнца говорит и тот факт, что не было даже относительно слабых вспышек классов В, С и М. Вспышки наблюдались только во время начала формирования КД и при распаде.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 16-42-910467 р_а.

Литература

- Андреева О.А., Малащук В.М., Ахтемов З.С., Жигалкин Р.К. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2018. Т. 114. № 1. С. 129.
- Вальдемайер (Waldmeier M.) // Z. Astrophys. 1956. V. 38. P. 219.
- Вальдемайер (Waldmeier M.) // Die Sonnenkorona. Birkhäuser. Basel. 1957. V. 2.
- Зельк Я.И., Степанян Н.Н., Андреева О.А. // Космічна наука і технологія. 2009. Т. 15. № 1. С. 44.
- Маланушенко Е.В. // Автореф. канд. дис. “Исследование атмосферы Солнца в области корональных дыр”. Спб: ГАО РАН. 2001.
- Степанян Н.Н., Долгополова Е.В., Елизаров А.И. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2001. Т. 96. С. 194.