

УДК 523.98

Изменение площади и интенсивности гигантской корональной дыры

О.А. Андреева, В.М. Малащук, З.С. Ахтемов, Р.К. Жигалкин

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым, 298409
olga@craocrimea.ru

Поступила в редакцию 14 ноября 2017 г.

Аннотация. Исследованы изменения характеристик долгоживущей (24 кэрринтоновских оборота) гигантской корональной дыры (ГКД) в процессе ее эволюции от возникновения до исчезновения. В работе использованы наблюдения Солнца в линии He I 1083 нм (БСТ-2 КраО РАН), данные SDO (AIA, канал 19.3 нм, HMI, магнитные измерения). В статье представлены результаты анализа изменений таких эволюционных характеристик, как площадь и интенсивность ГКД. Проведено сравнение площади ГКД в фотосфере, полученной с помощью модельных расчетов (PFSS) с площадями, определяемыми по данным наблюдений.

VARIATIONS IN THE AREA AND INTENSITY OF THE GIANT CORONAL HOLE, *by O.A. Andreeva, V.M. Malaschuk, Z.S. Akhtemov, R.K. Zhygalkin.* Variations in characteristics of the long-lived (24 Carrington rotations) giant coronal hole (GCH) have been studied in the process of their evolution from origination to extinction. In the paper we used solar observations in the HeI 1083 nm line (TST-2 CrAO RAS), SDO data (AIA, channel at 19.3 nm, HMI, magnetic measurements). The paper presents the results of an analysis of changes in such evolutionary characteristics as the area and intensity of GCH. A comparison is made of the GCH area in the photosphere obtained by means of model calculations (PFSS) with areas determined from observational data.

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

1 Введение

Корональные дыры (КД) – это крупномасштабные области короны с пониженной плотностью вещества и, по-видимому, температурой. Для КД характерна преимущественно открытая конфигурация силовых линий магнитного поля. КД наблюдаются в рентгеновском, ультрафиолетовом и микроволновом диапазонах как темные образования на солнечном диске (Калер, Хадсон, 2002) и как более яркие участки в инфракрасном излучении в линии He I 10830 Å; в последнем случае область КД характеризуется также исчезновением или размыванием хромосферной сетки (Степанян, Маланушенко, 2001; Зирин, 1988). КД стали объектом интенсивных исследований в начале 1970-х гг., когда выяснилось, что они являются источниками высокоскоростных потоков солнечного ветра (ВСП) (Нолт и др., 1976.; Шили, Харви, 1981). Нолт и его соавторы установили прямую зависимость между площадью КД и скоростью истекающего из нее солнечного ветра. Позднее связь КД с ВСП устанавливалась неоднократно (Гослинг, Пиццо, 1999; МакКомас, Элиот, 2002; Занг и др., 2002, 2003).

Предположение о том, что яркость КД должна коррелировать с некоторыми характеристиками связанного с ней ВСП, в первую очередь со скоростью, было высказано около 20 лет назад в работах (Обридко и др., 2000) и с тех пор не проверялось. Другая связь, а именно корреляция скорости с площадью КД, проверялась неоднократно (Веселовский и др., 2006; Роббинс и др., 2006; Обридко и др., 2009). В частности, Роббинс и др. в 2006 году показали, что связь скорости солнечного ветра с площадью КД ухудшается в периоды высокой солнечной активности. Этого и можно было ожидать, поскольку корональные выбросы массы (КВМ), не связанные прямо с КД, дают резкие всплески скорости, которые нарушают корреляцию с площадью КД (Обридко и др., 2009). Кроме того, в периоды высокой солнечной активности увеличивается роль замкнутых силовых линий, которые дают особо медленные потоки. В работе (Врснак и др., 2007а, 2007б) авторы изучали связь скорости солнечного ветра с площадью КД в относительно спокойный период с января по май 2005 г. и получили довольно высокий коэффициент корреляции 0.62 при транспортном времени 4 дня.

Настоящая работа является первой из серии работ, посвященных исследованию эволюции и влияния на околоземное пространство долгоживущей гигантской КД 2015–2017 гг. В работе приводятся результаты анализа изменений таких эволюционных характеристик, как площадь и интенсивность ГКД. Проводится сравнение площади ГКД на уровне фотосферы, полученной с помощью модельных расчетов (PFSS), с площадями, определенными из наблюдательных данных для хромосферы и короны.

2 Данные и методы исследования

Работа основана на анализе изображений полного диска Солнца, полученных в двух спектральных диапазонах: в инфракрасной линии He I 10830 Å (КрАО РАН) и в ультрафиолетовой Fe XII 193 Å (SDO/AIA). Совместно с ними анализировались также данные о магнитном поле (SDO/HMI) и ре-

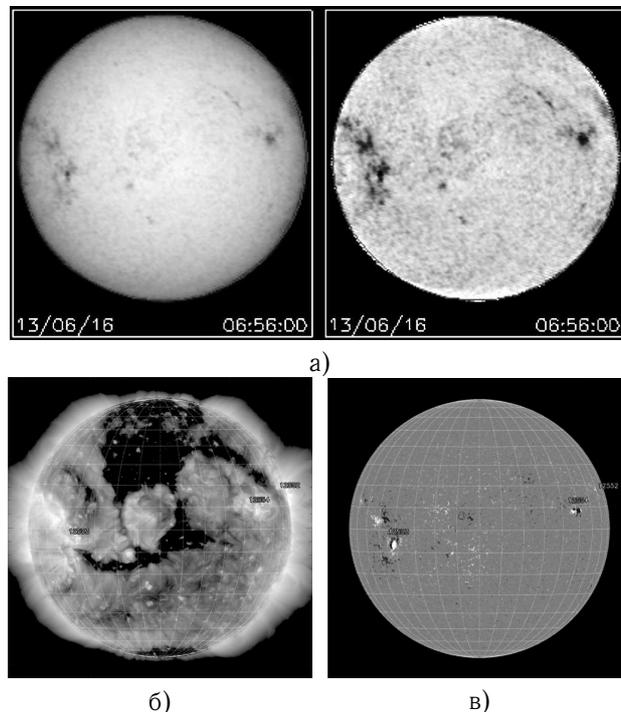


Рис. 1. Изображения диска Солнца, полученные 13.06.2016 г. в инфракрасной линии He I в КрАО РАН с учетом потемнения к краю диска (а – справа), в ультрафиолетовой Fe XII на SDO/AIA (б) и магнитограмма SDO/HMI (в)

зультаты модельных расчетов. Корональные дыры на изображениях He I (рис. 1а) видны как светлые образования, а на изображениях Fe XII (рис. 1б) – как темные.

Ко всем изображениям была применена процедура предварительной обработки: для изображений в линии He I 10830 Å (He I) было учтено потемнение к краю и произведено нормирование яркости изображения. Изображения в линии Fe XII 193 Å (Fe XII) были приведены к масштабу изображений в линии He I. При помощи специально разработанной нами программы Solar Data Application (SDA) для получения параметров выделенных контуров на диске Солнца были определены площади и средняя интенсивность ГКД.

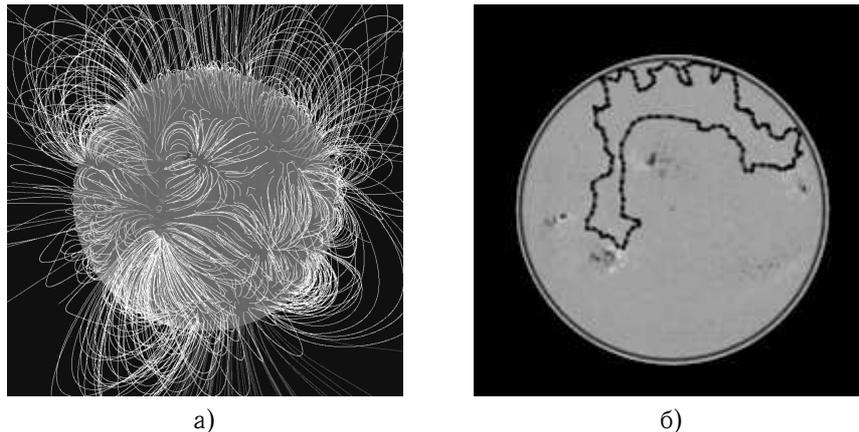


Рис. 2. Результаты моделирования магнитного поля (PFSS) на уровне фотосферы по данным SDO/HMI (а) и контур КД на магнитограмме (б) за 25.02.2016 г. (CR 2174)

Для определения площади ГКД на уровне фотосферы к данным о магнитном поле (SDO/HMI) был применен пакет программ Solar Soft Potential Field Source Surface (PFSS). PFSS, в рамках потенциального приближения магнитного поля фотосферы, рассчитывает магнитное поле для высот от 1 до $2.5 R_{\odot}$ где R_{\odot} – радиус Солнца. По силовым линиям магнитного поля, рассчитанным для уровня фотосферы $h = 1.0 R_{\odot}$ (а), на магнитограмме для CR 2174 проведены контуры ГКД (б), что позволило определить ее площадь (рис. 2).

3 Изменение площади ГКД

Появление КД на диске Солнца, которая бы занимала значительную его часть и существовала больше 2-х десятков кэррингтоновских оборотов (CR) при регулярных наблюдениях – большая редкость. Время ее существования – 24 оборота (CR 2165 – CR 2188), что соответствует временному интервалу: июнь 2015 г. – март 2017 г.

Признаки исследуемой ГКД первоначально были обнаружены в июне 2015 г. на широте около 25° (CR 2165). Через два дня, когда КД оказалась около нулевого меридиана, была определена ее площадь. В течение последующих оборотов ГКД меняла свою площадь, положение и яркость. Максимальная площадь, занимаемая ГКД, составила $\sim 8 * 10^{11}$ км² в короне и $\sim 6 * 10^{11}$ км² на фотосфере. В максимуме своего развития ГКД распространилась до 30 градусов южной полушария.

Сначала нами были определены площади ГКД для верхних слоев атмосферы Солнца по изображениям, полученным в линиях He I и Fe XII. Площадь ГКД измерялась в км². Результаты представлены на рис. 3 (две верхние линии графика).

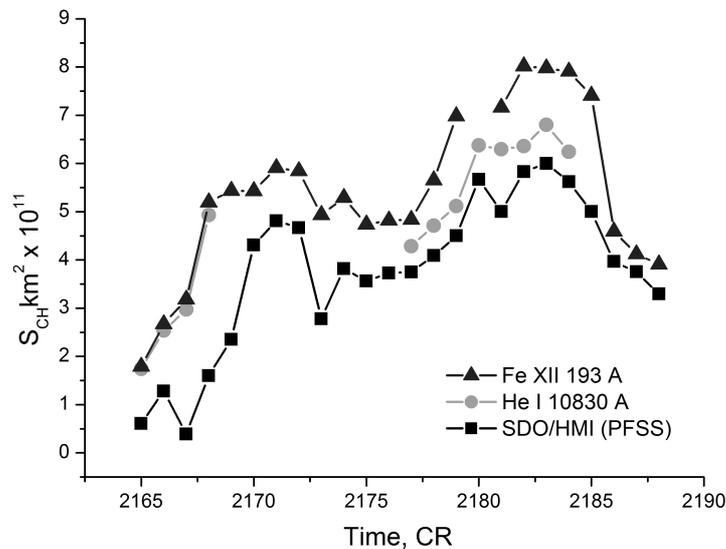


Рис. 3. Изменение площади ГКД, полученной по наблюдениям в линиях Fe XII (треугольники), He I (кружки) и по модельному расчету в фотосфере (квадратики)

Полученные с помощью модельных расчетов площади ГКД на уровне фотосферы, нижняя кривая рис. 3, были сопоставлены с площадями, полученными по наблюдениям в хромосфере и короне. Выявлена зависимость изменения площади ГКД в процессе эволюции на 3-х высотах (рис. 3).

Эволюция ГКД имела 3 ярко выраженных этапа. В начальной стадии развития площадь КД увеличивалась как за счет изменения внешних границ, так и за счет возникновения флоккульных элементов, пор и активных областей. На стадии роста площадь ГКД на трех высотах синхронно растет. Причем на уровне хромосферы и короны разница в площадях почти неразличима.

Этап формирования ГКД в короне завершается раньше (через 4 CR), чем в фотосфере (через 6 CR). При этом площадь на всех уровнях существенно увеличивается, в короне и хромосфере \sim в 4 раза, на фотосфере в 9 раз. Затем наступает первая стадия более-менее стабильного существования КД в короне CR 2168 – CR 2172, для фотосферы CR 2170 – CR 2172, когда площадь с флуктуациями \sim 30 % мало меняется. На уровне короны и фотосферы в изменении площади КД после CR 2172 наблюдается резкий спад, а после CR 2177 – существенное ее увеличение, определяющее вторую стадию формирования ГКД. За время существования ГКД через нее прошли 2 активных образования, что сказалось на изменении ее параметров. В течение трех оборотов (CR 2175 – CR 2177) уменьшение площади КД на уровне короны сопровождалось существенной перестройкой КД и сменой активных корональных центров. Вторая стадия сформированной КД продлилась восемь оборотов (CR 2178 – CR 2185). Максимум площади здесь составил $\sim 8 \cdot 10^{11}$ км² в короне и $\sim 6 \cdot 10^{11}$ км² на фотосфере. На завершающей стадии существования КД (после CR 2185) площадь начинает резко уменьшаться в короне, приближаясь к площади в фотосфере в конце (CR 2188).

4 Изменение интенсивности ГКД

В работе была исследована зависимость изменения средней интенсивности контура ГКД со временем. Интенсивность излучения в КД по наблюдениям в линиях Fe XII и He I измеряется в относительных единицах – единицах невозмущенного диска Солнца. Для He I эти значения менялись в пределах 1.006–1.022, для Fe XII – в пределах 0.16–0.46. На рис. 4 показано изменение средней интенсивности ГКД на высоте в линии Fe XII за все время ее существования (24 CR).

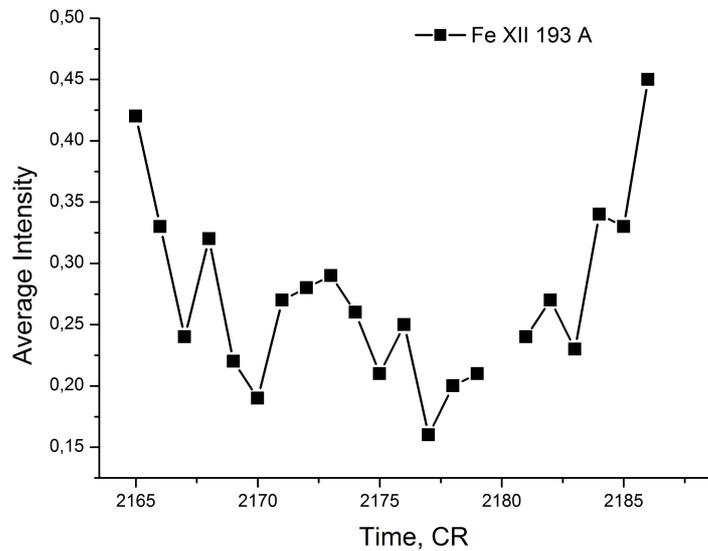


Рис. 4. Изменение средней интенсивности контура ГКД со временем за 24 CR (2015–2017), полученное по данным SDO/AIA в линии Fe XII 193 Å

5 Выводы

Были исследованы особенности эволюции долгоживущей ГКД от ее рождения до исчезновения. Основные результаты нашего исследования можно сформулировать следующим образом:

- Рост площади с момента зарождения ГКД составляет для короны 4 CR, 20 оборотов площадь ГКД стабилизируется, меняясь в пределах 30 %, и 4 CR проходит от уменьшения площади ГКД до ее исчезновения. Для фотосферы эти фазы составляют соответственно 6, 13 и 5 оборотов.
- Изменения площади ГКД с середины 2015 г. по март 2017 г. происходят почти синхронно в границах, определенных по модельным расчетам PFSS на уровне фотосферы и по изображениям Солнца в линиях He I и Fe XII.
- Средняя интенсивность КД зависит от момента ее эволюции. Она меняется от интенсивности невозмущенной области до интенсивности КД. Со временем КД становилась все темнее и темнее в линии Fe XII. Этот процесс длится примерно столько же, сколько и рост площади.
- Уменьшение интенсивности в линии He I хорошо коррелирует с увеличением интенсивности в линии Fe XII.
- Границы ГКД, проведенные по силовыми линиям, полученным по PFSS для выбранных высот, в большинстве случаев хорошо согласуются с границами ГКД, определенными по наблюдениям интенсивностей.

Результаты этих исследований будут использованы нами далее для сопоставления с параметрами солнечного ветра и дальнейшего изучения влияния на околоземную космическую погоду.

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

Литература

- Веселовский И.С., Персианцев И.Г., Русанов А.Ю., Шугай Ю.С. // Астрон. вестник. 2006. Т. 40. С. 427.
- Врснак и др. (Vrsnak B., Temmer M., and Veronig A.M.) // Solar Phys. 2007a. V. 240. P. 315.

- Врснак и др. (Vrsnak B., Temmer M., and Veronig A.M.) // *Solar Phys.* 20076. V. 240. P. 331.
- Гослинг, Пиццо (Gosling J.T. and Pizzo V.J.) // *Space Sci. Rev.* 1999. V. 89. P. 21.
- Занг и др. (Zhang J., Woch J., Solanki S.K., and R. von Steiger) // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. P. 1236.
- Занг и др. (Zhang J., Woch J., Solanki S.K., et al.) // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. P. 1144.
- Зирин (Zirin H.) // *The Sun.* New York: Cambridge University Press. 1988. P. 259.
- Калер, Хадсон (Kahler S.W. and Hudson H.S.) // *Astrophys. J.* 2002. V. 574. P. 467.
- МакКомас, Элиот (McComas D.J. and Elliot H.A.) // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. P. 1314.
- Нолт и др. (Nolte J.T., Krieger A.S., Timothy A.F., et al.) // *Solar Phys.* 1976. V. 46. P. 303.
- Обридко и др. (Obridko V.N., Fomichev V.V., Kharshiladze A.F., et al.) // *Astron. Astrophys. Trans.* 2000. V. 18. P. 819.
- Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. и др. // *Астрон. журн.* 2009. Т. 86. № 11. С. 1125.
- Роббинс и др. (Robbins S., Henney C.J., and Harvey J.W.) // *Solar Phys.* 2006. V. 233. P. 265.
- Степанян Н.Н., Маланушенко Е.В. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2001. Т. 97. С. 76.
- Шили, Харви (Sheeley N.R., Jr., Harvey J.W.) // *Solar Phys.* 1981. V. 70. P. 237.