

КОРОНАЛЬНЫЕ ПОЛЯРНЫЕ ДЖЕТЫ ПО ДАННЫМ STEREO В ПЕРИОД С 2009 ПО 2014 г.

А.В. Кудрявцева, Д.В. Просовецкий

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
kudryavtseva@iszf.irk.ru

CORONAL POLAR JETS OBSERVED WITH STEREO DURING 2009–2014

A.V. Kudryavtseva, D.V. Prosovetsky

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Аннотация. На большинстве изображениях коронографов белого света COR2 (область наблюдения 2.5–15 солнечных радиуса), расположенных на космическом аппарате STEREO, в полярных областях солнечной короны наблюдаются яркие, узкие струи вещества, называемые джеты. Нами была исследована частота появления этих структур за период с 2009 по 2014 г., что охватывает почти половину солнечного цикла. Определены угловые размеры джетов, рассмотрена взаимосвязь с видимостью полярных корональных дыр (КД). Обнаружено уменьшение общего числа джетов с ростом цикла солнечной активности (СА), а также асимметрия в их количестве над северным и южным полюсами.

Ключевые слова: Солнце, корона, корональные джеты, видимый свет.

Abstract. There are jets – bright, narrow streams of matter outflow the Sun — on white-light data by coronagraphs COR2/STEREO in polar regions of solar corona. We investigated appearance of these structures during 2009–2014 years that covers almost half of the solar cycle. There were determine angular width of jets and consider relationships between visibility of polar coronal holes (CH) and jet's appearance. Was found that total number of jets was decreased over this period where solar cycle was increased. We obtained asymmetry in jet's number over the northern and southern poles.

Keywords: Sun, corona, coronal jets, visible light.

Введение

Солнечная корона в спокойных областях является сложной структурой с полярными перьями в высоких и стримерами в средних и экваториальных широтах. В этих структурах солнечной короны наблюдаются джеты – вытянутые в радиальном направлении неоднородности, перемещающиеся от Солнца и наблюдаемые в различных диапазонах от рентгена до видимого света [Shimojo et al., 1996; Wang et al., 1998a; Wood et al., 1999; Dobrzycka et al., 2000; Subramanian et al., 2010; Madjarska et al., 2012]. Первоначально полярные корональные джеты были обнаружены на изображениях, полученных в крайнем ультрафиолете EIT/SOHO [St.Cyr et al., 1997; Gurman et al., 1998] и рентгене [Shimojo, 1996]. Полярные джеты выглядят в линии Fe XII $\lambda 195\text{\AA}$ как яркие (по отношению к фону) узконаправленные ($1-4^\circ$) струи вещества, появляющиеся 3–4 раза в день вблизи ярких точек внутри полярных корональных дыр (КД) [St.Cyr et al., 1997; Wang et al., 1998b]. Также при сопоставлении позиционных углов были найдены соответствия между джетами, наблюдающимися в видимом свете и в ультрафиолетовом диапазоне [Wang et al., 1998b; Wang, Sheeley, 2002]. Области возникновения джетов обычно считают яркие точки внутри КД [Subramanian et al., 2010; Paraschiv et al., 2010; Madjarska et al., 2012; Yu et al., 2014]; биполярные области внутри КД и на их границах [Fisk et al., 1998; Wang et al., 2002; Madjarska et al., 2004; Nistico et al., 2009; Madjarska, Wiegmann, 2009; Edmondson, 2012]. Различные процессы внутри магнитно-закрытых структур приводят к пересоединениям с окружающим открытым магнитным полем, что приводит к распространению

плазмы вдоль линий магнитного поля. Этот механизм впервые показан в работе [Yokoyama, Shibata, 1995] для горячих джетов в крайнем ультрафиолетовом излучении, рентгеновском диапазоне и он успешно подтверждается более современными исследованиями [Nistico et al., 2009]. Уменьшение количества джетов при приближении максимума цикла солнечной активности (СА) также косвенно подтверждает этот механизм, так как полярные КД уменьшаются и практически исчезают в этот период.

В настоящей работе были исследованы джеты в полярных областях солнечной короны на расстояниях от 4 до 15 солнечных радиусов по данным коронографов в белом свете COR2/STEREO-A,B. Также была рассмотрена взаимосвязь количества наблюдаемых джетов с видимостью полярных КД в линии Fe XII $\lambda 195\text{\AA}$.

Наблюдения

STEREO — это два одинаковых по набору инструментов космических аппарата (STEREO-A и STEREO-B), движущихся вокруг Солнца навстречу друг другу по орбитам, близким к орбите Земли. На изображениях коронографов белого света COR2/STEREO корона над полюсами Солнца имеет лучевую структуру, состоящую из отдельных лучей разной яркости и ширины и протяженную на значительные расстояния от фотосферы. Внутри этих лучей наблюдаются джеты — более яркие по отношению к фону особенности, имеющие вытянутую в радиальном направлении форму и перемещающиеся от Солнца. Угловые размеры джетов на расстояниях 4–15 солнечных радиусов составляли $\sim 3^\circ$ в ближней к Солнцу точке и $\sim 8^\circ$ — в дальней. При удалении от

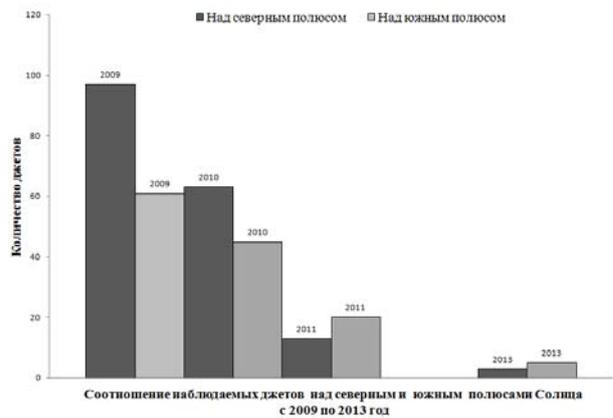
Солнца яркость джетов уменьшалась, и они переставали быть видимыми на окружающем фоне. В работе использовались изображения COR2/STEREO-A,B уровня обработки $I_z 0.5$, доступные на <ftp://stereo-ftp.nascom.nasa.gov>, обработанные с помощью процедур из библиотеки SolarSoft. Чтобы как можно точнее выделить джеты в отдельную группу, при помощи каталогов корональных выбросов массы (КВМ) [<http://spaceweather.gmu.edu/seeds/secchi.php>; https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/] для изучения были выбраны дни, в которые не наблюдались КВМ или же они были слабые и не затрагивали полярные области. После отбора по этим критериям данные за 2012 и 2014 г. были исключены из рассмотрения, поскольку в эти периоды было трудно отделить джеты от зафиксированных КВМ. Для выделения джетов на изображениях COR2/STEREO использовался метод разностных изображений «бегущая разность», когда предыдущий кадр вычитался из текущего. Затем из них строились высотно-временные диаграммы для полярных областей солнечной короны ($\pm 30^\circ$ от вертикальной оси). Подобная методика исследования движения различных корональных структур неоднократно применялась различными авторами [Sheeley et al., 1997; Wang et al., 1998].

Результаты

Всего были проанализированы 78 дней, в которые зафиксировано 312 джетов (179 над северным полюсом и 133 над южным). Среднее количество джетов в день равно 4, однако в выборке присутствуют дни, в которые джеты не были зафиксированы ни на одном из полюсов Солнца, или наблюдались только на одном из них. На рис. 1 представлена диаграмма, отображающая количество джетов над южным и северным полюсом Солнца в период с 2009 по 2013 г. Наблюдается уменьшение общего количества джетов с приближением максимума цикла СА — увеличивается количество КВМ и уменьшается число «спокойных» дней, пригодных для анализа. Следует отметить асимметрию в преобладании джетов над северным полюсом в 2009–2010 гг., и обратную асимметрию после 2011 года, когда возросло количество джетов над южным полюсом, что может быть связано с конфигурацией магнитного поля. Анализ изображений диска Солнца показал, что КД практически всегда были видны в этот период в линии Fe XII $\lambda 195\text{\AA}$ на полюсах. Явную зависимость между их наличием и количеством наблюдаемых джетов обнаружить не удалось. Объяснить это можно двумя причинами:

1) ориентироваться следует не только на видимость в крайнем ультрафиолете КД, а на иные параметры, такие как площадь или внутренняя структура КД;

2) на плоскость изображения проецировались не только джеты из полярных КД, но и из окружающих областей. В частности, отмечено наличие высоких петельных структур, окружающих южную полярную КД в 2011–2014 гг.



Изменение количества джетов над северным (темно-серый) и южным (светло-серый) полюсами в период с 2009 по 2013 г.

Заключение

Было проанализировано изменение количества джетов в полярных областях солнечной короны в период с 2009 по 2013 г. в дни без КВМ или с КВМ вне исследуемого диапазона углов. Обнаружена северно-южная асимметрия с преобладанием джетов над северным полюсом — до 2010 г. включительно, над южным — в 2011 и 2013 гг. Причина асимметрии может быть в конфигурации глобального магнитного поля Солнца. Установлено, что нет прямой зависимости между количеством джетов и видимостью полярных КД по данным в линии Fe XII $\lambda 195\text{\AA}$. Для изучения подобной взаимосвязи требуются дополнительные исследования. Обнаружено уменьшение общего количества наблюдаемых джетов с ростом цикла СА, что согласуется с ранними работами. Объясняется это тем, что увеличивается СА, уменьшается площадь полярных КД, а также уменьшается количество пригодных для наблюдения дней.

Список литературы

- Dobrzycka D., Raymond J.C., Cranmer S.R. Ultraviolet spectroscopy of polar coronal jets // *Astrophys. J.* 2000. V. 538. P. 922–931.
- Edmondson J.K. On the role of interchange reconnection in the generation of the slow solar wind // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 172. P. 209–225.
- Fisk L.A., Schwadron N.A., Zurbuchen T.H. On the slow solar wind // *Space Sci. Rev.* 1998. V. 86. P. 51–60.
- Gurman J.B., Thompson B.J., Newmark J.A., et al. New images of the solar corona // *ASPCs* 1998. V. 154. P. 329–344.
- Madjarska M.S., Doyle J.G., van Driel-Gesztelyi L. Evidence of magnetic reconnection along coronal hole boundaries // *Astrophys. J. Lett.* 2004. V. 603. L57–L59.
- Madjarska M.S., Wiegelmann T. Coronal hole boundaries evolution at small scales // *Astron. Astrophys.* 2009. V. 503. P. 991–997.
- Madjarska M.S., Huang Z., Doyle J.G., et al. Coronal hole boundaries evolution at small scales // *Astron. Astrophys.* 2012. V. 545, A67.
- Nistico G., Bothmer V., Patsourakos S., et al. Characteristics of EUV coronal jets observed with STEREO/SECCHI // *Solar Phys.* 2009. V. 259. P. 87–108.

Paraschiv A.R., Lacatus D.A., Badescu T., et al. Study of coronal jets during solar minimum based on STEREO/SECCHI observations // *Solar Phys.* 2010. V. 264. P. 365–375.

Sheeley N.R.Jr., Wang Y.-M., Awhley S.H., et al. Measurements of flow speeds in the corona between 2 and 30 R_{\odot} // *Astrophys. J.* 1997. V. 484. P. 472–478.

Shimojo M., Hashimoto S., Shibata K., et al. Statistical study of solar X-Ray jets observed with the Yohkoh soft X-Ray telescope // *Publ. Astron. Soc. Japan.* 1996. V. 48. P. 123–136.

St. Cyr O.C., Howard R.A. Simnett G.M., et al. White-light Coronal Mass Ejections: a new perspective from LASCO // *ESA SP.* 1997. V. 415. P. 103–110.

Subramanian S., Madjarska M.S., Doyle J.G. Coronal hole boundaries evolution at small scales // *Astron. Astrophys.* 2010. V. 516, A50.

Wang Y.-M., Sheeley Jr., N.R., Walters J.H., et al. Origin of streamer material in the outer corona // *Astrophys. J. Lett.* 1998a. V. 498. L165–L168.

Wang Y.-M., Sheeley N.R. Jr., Socker D. G., et al. Observations of correlated white-light and extreme-ultraviolet jets from polar coronal holes // *Astrophys. J.* 1998b. V. 508. P. 899–907.

Wang Y.-M., Sheeley N.R. Jr. Coronal white-light jets near sunspot maximum // *Astrophys. J.* 2002. V. 575. P. 542–552.

Wood B.E., Karovska M., Cook J.W., et al. Kinematic measurements of polar jets observed by the Large-Angle Spectrometric Coronagraph // *Astrophys. J.* 1999. V. 523. P. 444–449.

Yokoyama T., Shibata K. Magnetic reconnection as the origin of X-Ray jets and H α surges on the SUN // *Nature.* 1995. V. 375. P. 42–44.

Yu H.-S., Jackson B.V., Buffington A., et al. The three-dimensional analysis of HINODE polar jets using images from LASCO C2, the STEREO COR2 coronagraphs, and SMEI // *Astrophys. J.* 2014. V. 784. P. 166–175.

URL: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list (дата обращения 25.04.2017)

URL: <http://spaceweather.gmu.edu/seeds/secchi.php> (дата обращения 26.04.2017)