

ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ОТ ПЛОЩАДИ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР И ИХ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ

Ахтемов З.С., Цап Ю.Т.

Крымская Астрофизическая Обсерватория РАН, пос. Научный, Крым, Россия

DEPENDENCE OF SOLAR WIND SPEED ON THE AREA OF CORONAL HOLES AND THEIR FRACTAL DIMENSION

Akhtemov Z.S., Tsap Y.T.

Crimean Astrophysical Observatory RAS, Nauchny, Crimea, Russia

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-19-22>

Recently, Samara et al. [1] have shown that proportionality between the solar fast wind velocity V of the coronal holes (CHs) and their area S is satisfied only for small-sized CHs, while the saturation effect for larger CHs is revealed, i.e., a plateau is formed in a $V(S)$ plot. Author of this is explained by the geometric complexity of CHs, described by the fractal dimension. Previously, Akhtemov and Tsap [2, 3] established that the correlation coefficient between V and S reaches a maximum for the CHs located within the slice: $\pm 10^\circ$ in longitude and $\pm 40^\circ$ in latitude. They suggested that this inference is related to the radial propagation of the solar wind and, hence, the increasing of S should not be accompanied by an increase of V for large CHs. The presented work provides a detailed comparative analysis of the results obtained by Samara et al. [1] and Akhtemov and Tsap [2, 3]. Arguments are given in favor of the model connected the saturation effect with the radial propagation of the fast solar wind.

Введение

Солнечный ветер (СВ) – это поток корональной плазмы в межпланетное пространство, в котором выделяют быструю (500–1000 км/с) и медленную (300–500 км/с) компоненты. Быстрый СВ, разделяемый на рекуррентный и спорадический, за который ответственны соответственно корональные дыры (КД) и корональными выбросами массы, может приводить к геомагнитным возмущениям магнитного поля Земли.

Как известно, связь между скоростью потока рекуррентного ветра V и площадью КД S описывается уравнением регрессии [1–8]:

$$V = kS + b, \quad (1)$$

где k и b – некоторые константы. При этом коэффициент корреляции варьируется в широких пределах от 0.4 до 0.9 [7].

Недавно в статье [1] было показано, что пропорциональность между скоростью V и площадью S выполняется лишь для КД малых размеров, тогда как для более крупных КД наступает эффект насыщения, т.е. на графике $V(S)$ формируется плато (рис. 1). По мнению авторов, это можно объяснить геометрической сложностью КД, для описания которой использовалась, в частности, фрактальная размерность (ФР). Между тем согласно ра-

ботам Akhtemov, Tsar [2, 3] зависимость $V(S)$ скорее определяется местом расположения корональной дыры на диске Солнца.

Цель нашей работы – выяснить природу эффекта насыщения для зависимости пиковой скорости высокоскоростного потока (ВСП) от площади КД.

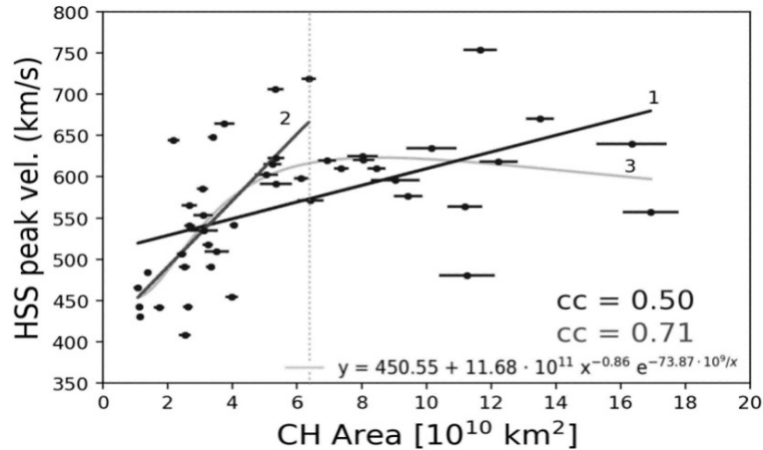


Рис. 1. Зависимость скорости быстрого солнечного ветра (HSS) от площади КД (CH Area), полученная в [1]. Линия 1 соответствует линейной аппроксимации, примененной ко всей выборке, линия 2 – подмножеству, обеспечившему наилучшую корреляцию, и линия 3 – степенной экспоненциальной аппроксимации для всей выборки. Вертикальная пунктирная линия разделяет две группы и устанавливает порог $S_{ch} = 6.4 \times 10^{10} \text{ км}^2$, за которым пиковая скорость быстрого ветра не зависит от площади КД, т.е. наступает эффект насыщения.

Сравнительный анализ результатов

ФР характеризует сложность объекта и самоподобие структуры при различных масштабах [9]. Длина границы фрактального объекта может быть математически определена с помощью степенного закона следующего вида:

$$N(r) = \text{const } r^{-D}, \quad (2)$$

где $N(r)$ представляет собой меру фрактальной структуры на масштабе r . Параметр D называется фрактальной размерностью. Он характеризует меру того, насколько полностью объект заполняет пространство. Если D – целое число, то оно равен евклидовой размерности, в которой идеальная точка имеет размерность 0, линия – 1, плоскость – 2, а идеальный твердый объем – 3. Применяя это к картам границ КД, которые могут включать замкнутые линии внутри КД, получим, что ФР находится в диапазоне $1 < D < 2$.

Из рис. 2, взятого из работы [1], видно, что с уменьшением ФР т.е. с уменьшением сложности КД (см. надписи на рисунках), коэффициент корреляции между V и S растет. Следовательно, однородные КД небольших площадей эффективнее ускоряют солнечный ветер.

В более ранних Akhtemov, Tsar [2, 3] исследовалась зависимость пиковой скорости солнечного ветра V от площади выделенного участка из

КД вблизи центра диска Солнца ΔS . Нами “вырезался” в КД участок вдоль центрального меридиана шириной $\Delta L = \pm 10^\circ, \pm 20^\circ, \pm 30^\circ$ по долготе и $\Delta \varphi = \pm 20^\circ, \pm 40^\circ, \pm 60^\circ, \pm 80^\circ$ по широте (рис. 3а). В результате, мы получили наибольший коэффициент корреляции между V (рис. 3б) и S равным 0,76

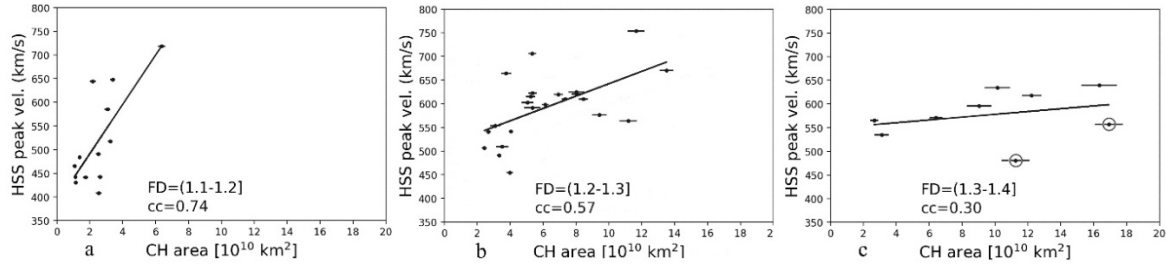


Рис. 2. Зависимости максимальной скорости быстрого солнечного ветра HSS от площади корональных дыр CH area для различных диапазонов ФР: 1.1-1.2 (а); 1.2-1.3 (б); 1.3-1.4 (с), которые соответствуют коэффициентам корреляции 0.74;0.57;0.30.

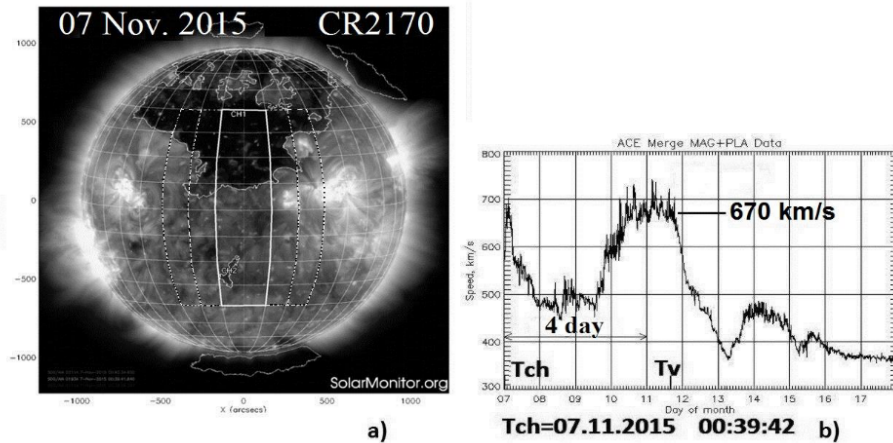


Рис. 3. Схематическое изображение выделенного участка КД (а) и метода определения скорости быстрого солнечного ветра по времени задержки $Tv = TCH + 4 \pm 1.5$ дня (б).

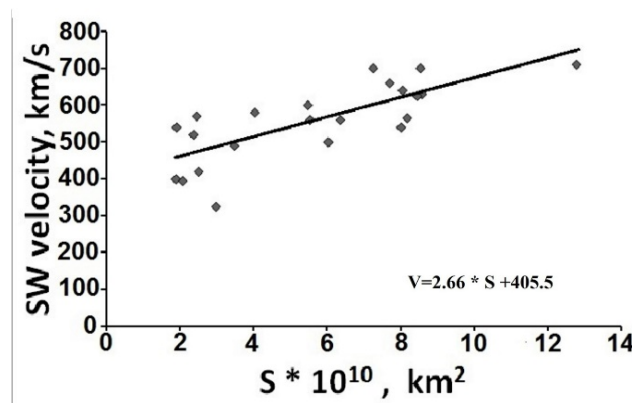


Рис. 4. Диаграмма рассеяния площади выделенного участка КД S и соответствующей пиковой скорости СВ SW для в кэррингтоновских оборотов CR2165-CR2188.

для исследуемых КД при размере выделенного участка по долготе $\Delta L = \pm 10^\circ$ и по широте $\Delta \varphi = \pm 40^\circ$. Интересно отметить, что наши резуль-

таты сравнительно хорошо согласуются с промежуточными выводами Samara et al. [1] при определении зависимости пиковой скорости ВСП от долготной и широтной протяженности КД, у которых наибольший коэффициент корреляции оказался равным 0.75 и 0.53 соответственно при $\Delta L = \pm 16^\circ$ и $\Delta \varphi = \pm 54^\circ$. Однако в противовес рис. 1. зависимость между найденными значениями V и S близка к линейной (рис. 4). Как видно, в отличие от у Samara et al. [1], порог для $S_{ch} = 6.4 \times 10^{10} \text{ км}^2$, после которого для значений пиковой скорости V наступает насыщение, и скорость солнечного ветра перестает расти с увеличением площади КД (рис. 1), у нас не обнаруживается. Это предполагает, что неоднородность вторична по отношению к расположению КД на диске Солнца.

Вывод

Эффект насыщения, обнаруженный в статье Samara et al. [1] скорее обусловлен радиальным распространением высокоскоростных потоков солнечного ветра, т.е. положением КД на диске Солнца относительно плоскости эклиптики и центрального меридиана, а не фрактальной размерностью КД.

Работа выполнена при частичной поддержке Минобрнауки (НИР № 1021051101548-7-1.3.8).

Литература

1. Samara et al. // A&A, 2022, v. 662, p. A68.
2. Akhtemov, Z.S., & Tsap, Yu.T. // G&A., 2018, v. 58, p. 1187.
3. Akhtemov, Z.S., & Tsap, Yu.T. // AApTr, 2019, 31, p.193.
4. Nolte et al. // Solar Phys., 1976, v. 46, p. 303.
5. Vršnak et al. // Solar Phys., 2007, v. 240, p.315.
6. Abramenko et al. // Solar Phys., 2009, v.260, p.43.
7. Karachik, N.V.&Pevtsov, A.A. // ApJ, 2011, v. 735, p.47.
8. Shugai et al. // G&A, 2009, v.49, p.435.
9. Mandelbrot, B.B. // 1983, The Fractal Geometry of nature/Revised and enlarged edition (New York: WH Freeman and Co.).