

УДК 523.9

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО И ТРАНЗИЕНТНОГО ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В МАКСИМУМЕ 24-ГО СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА

Д. Г. Родькин<sup>1</sup>, Ю. С. Шугай<sup>2</sup>, В. А. Слемзин<sup>1</sup>, И. С. Веселовский<sup>2</sup>

*Рассмотрено взаимодействие межпланетного коронального выброса массы (МКВМ) и высокоскоростного потока солнечного ветра (ВСП СВ), связанного с корональной дырой (КД). На примерах двух событий в максимуме 24-го цикла с 4 по 16 июня и с 30 июня по 10 июля 2012 года показано, что в случае, когда источник МКВМ находится вблизи границы КД, вследствие смешивания потоков в короне температурно-зависимые параметры ионного состава СВ оказываются ближе к значениям в ВСП СВ, чем в МКВМ.*

**Ключевые слова:** Солнце, солнечный ветер, корональный выброс массы, корональная дыра, активная область.

Наиболее геоэффективными (вызывающими магнитные бури) являются высокоскоростные рекуррентные потоки солнечного ветра (ВСП СВ) и межпланетные корональные выбросы массы (МКВМ). Источниками ВСП СВ являются корональные дыры (КД), которые ассоциируются с униполярными областями открытых линий магнитного поля. МКВМ являются продолжением корональных выбросов массы (КВМ), которые часто связаны со спорадическими процессами в активных областях (АО). Существует ряд моделей, которые используются для прогнозирования параметров потоков СВ на околоземной орбите с учетом распространения КВМ, например, WSA-ENLIL [1]. Однако они не учитывают возможного взаимодействия потоков СВ в короне, которое может привести к изменениям параметров солнечного ветра (СВ) у Земли и повлиять на геоэффективность СВ. Влияние КД на распространение МКВМ было рассмотрено в ряде работ [2–5]. Взаимодействие потоков СВ зависит от взаимного расположения корональных источников – КД и АО, с которой связан КВМ. Как будет показано ниже, в

<sup>1</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: rodkindg@gmail.com.

<sup>2</sup> НИИЯФ МГУ, 119991 Россия, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, 1с2.

результате такого взаимодействия могут измениться такие параметры СВ как скорость и плотность протонов, магнитное поле и ионный состав МКВМ (отношение числа ионов  $C^{6+}/C^{5+}$ ,  $O^{7+}/O^{6+}$ ,  $Fe/O$  и средний заряд ионов железа).

В данной работе рассмотрено влияние взаимного расположения и характеристик КД и АО на параметры СВ в области взаимодействия ВСП СВ и МКВМ на примере 2-х событий 24-го солнечного цикла, которые были зафиксированы у Земли, согласно каталогу МКВМ [6], в периоды: 1) 08.06.2012–10.06.2012 (Кэррингтоновский оборот КО 2124) и 2) 05.07.2012–06.07.2012 (КО 2125). Критерии выделения ВСП и МКВМ в СВ представлены в табл. 1. Параметры СВ в указанные периоды по 2-х-часовым данным спутника ACE приведены на рис. 1.

Т а б л и ц а 1

*Типичные параметры потоков СВ по сравнению с фоновыми значениями [7–9]*

Параметры СВ	Фоновый СВ	ВСП СВ из КД	МКВМ
$V_p$ , км/сек	360	>450	360–490
$T_p$ , $10^4 K$	6	>11	2.9–4.9
$C^{6+}/C^{5+}$	0.7	$\approx 0.4$	3–12
$O^{7+}/O^{6+}$	0.1	0.09–0.2	0.6–1.2
$Fe/O$	0.1	0.05–0.07	>0.2
$\langle Q \rangle Fe$	9	9.5–10.5	>12
$ B $ , нТл	4	1–5	>10

В обоих случаях МКВМ проявились на хвосте ВСП СВ и практически не выделялись в профиле скорости протонов. Зная время прихода МКВМ к Земле, расстояние от Земли до Солнца и среднюю скорость потока СВ на околоземной орбите (табл. 2), можно найти временную задержку  $\Delta t$  от момента возникновения КВМ у Солнца до момента регистрации МКВМ у Земли и определить возможный источник КВМ. При средней скорости МКВМ 470 км/с  $\Delta t \approx 3.7 \pm 0.5$  дня. Было получено, что наиболее вероятные источники МКВМ находились на Солнце в период: для первого события с 04.06.2012 до 05.06.2012 включительно, для второго – с 30.06.2012 до 01.07.2012.

Для полученных данных о КВМ, которые были направлены в сторону Земли, а также установления связи с их корональными источниками использовались изображения, получаемые с космических аппаратов (КА): STEREO-A, STEREO-B, SDO(AIA), SOHO(LASCO) [10–12]. КА SDO(AIA) и SOHO(LASCO) находятся на околоземной орбите и в точке либрации L1, а КА STEREO-A и STEREO-B в рассматриваемые периоды

находились на орбите Земли в положении  $\approx 117^\circ$  и  $-117^\circ$  по долготе относительно линии Солнце–Земля и получали “боковые” изображения Солнца. КВМ, направленные в сторону Земли определялись по их одновременному появлению в коронографах COR-2 STEREO-A на восточном лимбе и COR-2 STEREO-B на западном лимбе. При этом выделялись КВМ, движущиеся вблизи экваториальной плоскости (с учетом угловой ширины выброса).

Для первого МКВМ наиболее вероятным источником был КВМ 5 июня 2012 в 20:54 [13], который, скорее всего, был связан с АО 1493 (рис. 1(а)), расположенной вблизи КД, причем направление магнитного поля (МП) в прилегающей части АО противоположно полю в КД. Для второго события – КВМ 1 июля 2012 в 6:24 [13], скорее всего связанный с АО 1514, находящейся на значительном удалении от КД (рис. 1(в)).

Т а б л и ц а 2

*Параметры рассмотренных в данной работе МКВМ (средние, максимальные и минимальные значения), полученные по данным спутника ACE [15]*

Дата		$C^{6+}/C^{5+}$	$O^{7+}/O^{6+}$	$\langle Q \rangle Fe$	Fe/O	$N_p$ , см <sup>-3</sup>	$T_p$ , 10 <sup>4</sup> К	$V_p$ , км/сек	$ B $ , нТл
08.06.2012– 10.06.2012	среднее	0.67	0.39	10	0.25	1.88	2.6	473	4.69
	макс.	1.42	0.70	11	0.40	2.79	5.9	573	5.95
	мин.	0.29	0.19	9	0.14	1.07	1.2	404	3.70
05.07.2012– 06.07.2012	среднее	0.51	0.57	12	0.34	4.27	2.6	465	7.67
	макс.	1.26	0.98	13	0.42	8.36	7.0	496	9.99
	мин.	0.11	0.22	11	0.27	1.19	0.7	430	5.57

В настоящей работе анализируется влияние взаимодействия ВСП СВ и КВМ в короне на ионный состав СВ. Начальный ионный состав плазмы, образующей КВМ, формируется в короне во время вспышек, сопровождающихся эрупцией, и соответствует температурам в несколько миллионов градусов Кельвина (МК). При движении в плотной нижней части короны, в которой скорости процессов ионизации и рекомбинации достаточно велики, плазма охлаждается за счет столкновительной теплопроводности, излучения и адиабатического расширения. На расстоянии нескольких солнечных радиусов (от 1.5 до  $4R_\odot$  в зависимости от сорта иона и уровня активности [14]) времена ионизации и рекомбинации оказываются сравнимыми с временем прохождения плазмы до Земли, поэтому ионное состояние плазмы “замораживается” и не изменяется при движении в гелиосфере до Земли.

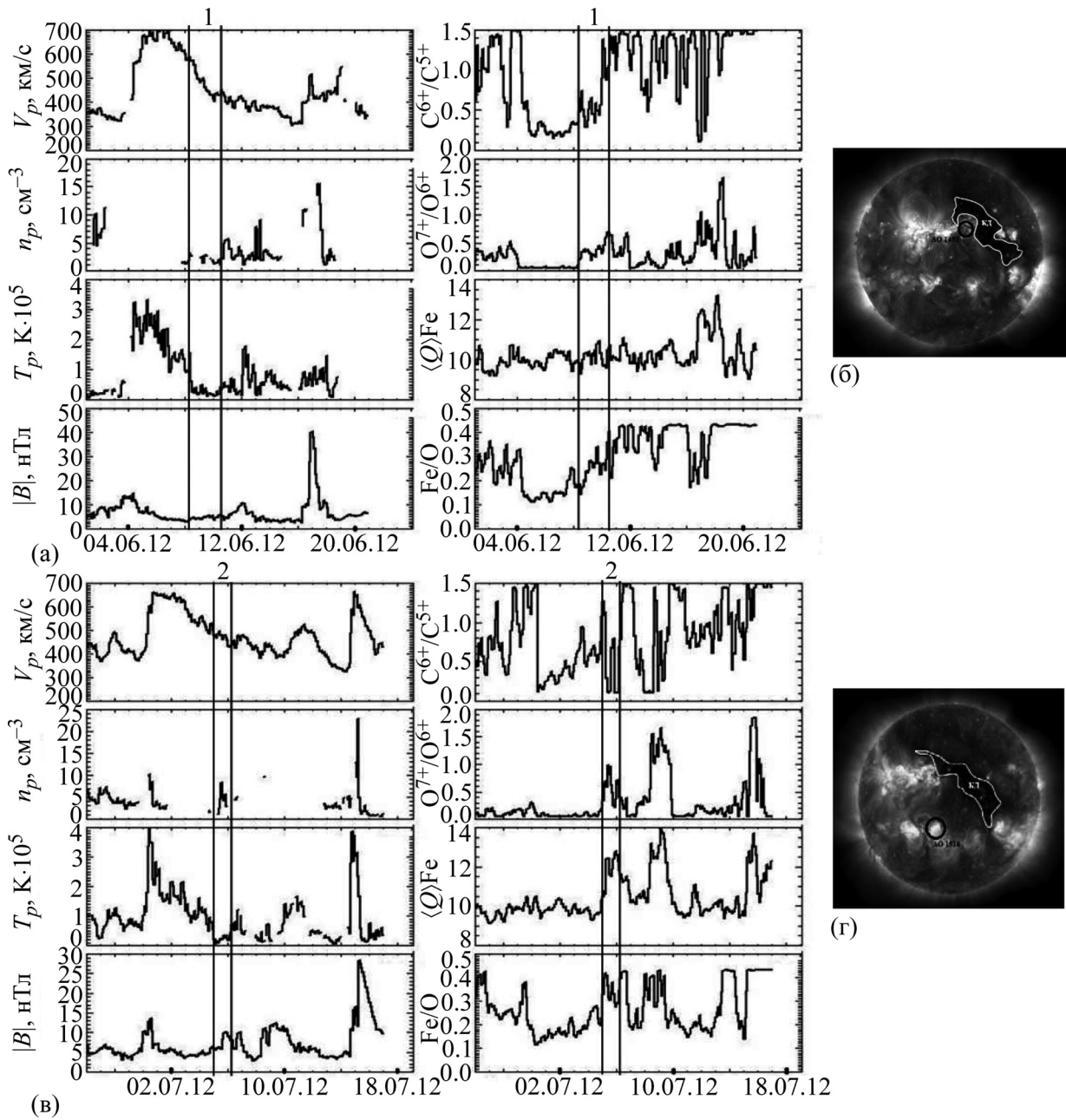


Рис. 1: Слева: графики скорости, плотности и температуры протонов, магнитного поля, отношения числа ионов  $C^{6+}/C^{5+}$ ,  $O^{7+}/O^{6+}$ ,  $Fe/O$  и среднего заряда железа  $\langle Q \rangle_{Fe}$  по данным КА ACE за период: (а) с 1 по 21 июня 2012 года, (в) с 26 июня по 17 июля 2012 года (рамками выделены рассматриваемые события); справа: (б), (г) изображения Солнца в линии 211А для этих событий с указанием их источников.

В табл. 2 представлены средние, минимальные и максимальные параметры СВ для рассмотренных выше событий. В первом рассмотренном случае (МКВМ 08.06.2012 – 10.06.2012) (рис. 1(а)) наблюдаются пониженные значения напряженности магнитного поля, кинетической температуры и плотности протонов, в то время как параметры ионного состава – отношения числа ионов  $O^{7+}/O^{6+}$ ,  $C^{6+}/C^{5+}$  и средний заряд ионов железа  $\langle Q \rangle_{Fe}$  – почти не отличаются от фоновых значений, что соответствует температуре источника, близкой к температуре короны  $T \sim 1.5$  МК. Отношение плотностей ионов  $Fe/O > 0.2$ , что свидетельствует о происхождении плазмы из замкнутой магнитной структуры АО [16]. Во втором случае (МКВМ 05.07.2012 – 06.07.2012) (рис. 1(в)) наблюдаются более высокие значения напряженности магнитного поля и плотности протонов, чем в первом случае, но эти величины меньше значению типичных для МКВМ (табл. 1). Отношение  $O^{7+}/O^{6+} > 0.6$ ,  $Fe/O > 0.2$  и средний заряд  $\langle Q \rangle_{Fe} \sim 13$ , что соответствует  $T \sim 2 - 3$  МК.

Таким образом, в первом случае взаимодействие МКВМ с ВСП СВ привело к тому, что ионные параметры МКВМ стали больше похожи на ионный состав, характерный для ВСП СВ. Во втором случае – эти параметры больше соответствуют типичному МКВМ. Это различие может быть связано с расположением источников КВМ относительно КД в КО 2124 и 2125. В первом случае источник – АО 1493 – примыкает к КД, и полярность магнитного поля ближайшего к КД пятна АО противоположна полярности КД. В этих условиях взаимодействие КВМ с ВСП СВ было сильным и очень вероятно, что произошло слияние потоков в результате пересоединения части линий магнитного поля в нижней области короны, где состояние плазмы определяется столкновениями. В результате перемешивания с более холодным потоком плазмы из КД ( $T \sim 1$  МК), степени ионизации ионов плазмы КВМ существенно понизились до величин, соответствующих температуре ВСП СВ из КД. Во втором случае расстояние между источниками было большим, ВСП находился на спаде, и взаимодействия в короне, скорее всего, не было, поэтому степень ионизации СВ была типичной для МКВМ. Таким образом, взаимодействие КВМ и ВСП СВ из КД может приводить к изменению ионного состава СВ в зависимости от взаимного расположения источников потоков – АО и КД – и их магнитной конфигурации.

Авторы выражают глубокую благодарность научным коллективам проектов SDO(AIA), STEREO, SOHO(LASCO) и ACE за предоставление доступа к данным. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-17-00098).

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] ENLIL Solar Wind Prediction—URL: <http://helioweather.net>.
- [2] A. A. Mohamed, N. Gopalswamy, S. Yashiro, et al., *J. Geophys. Res.* **117**, A01103 (2012).
- [3] B. E. Wood, C.-C. Wu, A. P. Rouillard, et al., *The Astrophysical Journal* **755**, 43 (2012).
- [4] N. Gopalswamy, P. Mäkelä, H. Xie, S. Akiyama, and S. Yashiro, *J. Geophys. Res.* **114**, A00A22 (2009).
- [5] P. Mäkelä, N. Gopalswamy, H. Xie, et al., *Solar Phys.* **284**, 59 (2013).
- [6] Near-Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections Since January 1996, compiled by Ian Richardson and Hilary Cane – URL: <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>.
- [7] H. V. Cane, I. G. Richardson, *J. Geophys. Res.* **108**, SSH 6-1 (2003).
- [8] I. G. Richardson, H. V. Cane, *Solar Phys.* **264**, 189 (2010).
- [9] N. Gopalswamy, P. Mäkelä, S. Akiyama, et al., *Solar Phys.* **284**, 17 (2013).
- [10] CDAW Data Center. SOHO LASCO CME CATALOG – URL: [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list).
- [11] George Mason University Space Weather Lab. Solar Eruptive Event Detection System – URL: <http://helio.gmu.edu/seeds/secchi.php>.
- [12] Solar Dynamics Observatory. AIA/HMI Browse Data – URL: <http://sdo.gsfc.nasa.gov>.
- [13] A software package for “Computer Aided CME Tracking” (CACTUS) – URL: <http://sidc.oma.be/cactus>.
- [14] U. Feldman, E. Landi, N. A. Schwadron, *Journal of Geophysical Research: Space Phys.* **110**, A07109 (2005).
- [15] The ACE Science Center (ASC). ACE Level 2 (Verified) Data – URL: <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/index.html>.
- [16] U. Feldman, *Phys. Scr.* **46**, 201 (1992).

Поступила в редакцию 6 апреля 2016 г.