

УДК 523.9

КРУПНОМАСШТАБНАЯ И МЕЛКОМАСШТАБНАЯ СТРУКТУРА СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА, ФОРМИРУЮЩАЯСЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПОТОКОВ В ГЕЛИОСФЕРЕ

© 2019 г. Д. Г. Родькин^{1, *}, К. Б. Капорцева², А. Т. Лукашенко³, И. С. Веселовский^{3, 4}, В. А. Слемзин¹, Ю. С. Шугай³

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия

²Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

³Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

⁴Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

*rodkindg@gmail.com

Поступила в редакцию 27.04.2018 г.

После доработки 10.05.2018 г.

Принята к публикации 15.05.2018 г.

Рассмотрена классификация потоков солнечного ветра по магнитогидродинамическим параметрам (МГД-типы) – комбинации скорости, плотности, температуры протонов и напряженности магнитного поля, в дополнение к классическому разделению солнечного ветра на высокоскоростные потоки из корональных дыр, транзитные потоки корональных выбросов массы и медленный солнечный ветер из пояса стримеров. Проведено сопоставление двух классификаций свойств солнечного ветра для событий в августе 2010 и мае 2011 г., когда наблюдалось взаимодействие двух корональных выбросов массы и коронального выброса массы с высокоскоростным потоком солнечного ветра из корональной дыры, соответственно. Показано, что классическое описание крупномасштабной структуры потоков ветра в масштабах часов и дней, в особенности ионного состава ветра, позволяет определить тип и источник потоков, в то время как МГД-параметры позволяют точнее описать мелкомасштабную структуру (минуты), в особенности, в случаях взаимодействия нескольких потоков в гелиосфере. Детальное исследование мелкомасштабной структуры областей взаимодействия потоков дает информацию, необходимую для развития МГД-моделей, описывающих процессы распространения и взаимодействия потоков в гелиосфере и прогнозирования их геоэффективности.

DOI: 10.1134/S0023420619010084

1. ВВЕДЕНИЕ

Наиболее распространенной классификацией потоков солнечного ветра является их разделение на квазистационарные высокоскоростные потоки (ВСП), спорадические потоки, связанные с корональными выбросами массы (КВМ) и медленный ветер [1–3]. В статье [4] была предложена классификация с разбиением плазмы солнечного ветра на 4 категории: плазма корональных дыр, плазма пояса стримеров, плазма областей смены секторов и транзитные события (такие как КВМ). Разбиение производилось по количественным критериям на основе трех параметров: энтропии протонов, их альвеновской скорости и их температуры относительно ожидаемой из скорости ветра. Эти потоки являются крупномасштабными во временной и пространственной шкале: ВСП делятся от нескольких дней до нескольких недель при скорости от 450 до 800 км/с, КВМ – от нескольких часов до 1–2 дней при ско-

рости от 200 до 2000 км/с, потоки медленного ветра имеют скорости порядка или меньше 400 км/с [3, 5–9].

Пространственные масштабы этих потоков связаны с размером и формой их источников на Солнце. ВСП происходят из корональных дыр, существуют на всех фазах солнечного цикла и вызывают умеренные, но продолжительные геомагнитные возмущения. КВМ происходят в результате спонтанной солнечной активности и связаны со вспышечными областями или с эрупцией волокон. Потоки солнечного ветра, ассоциирующиеся с КВМ, проявляют себя в гелиосфере как межпланетные корональные выбросы массы (МКВМ). Время прихода к Земле и параметры плазмы МКВМ зависят от положения и параметров источника эрупции, разгонной траектории КВМ и условий движения в гелиосфере. Медленный ветер истекает из стримеров и множества не-

локализованных источников в спокойной солнечной короне.

Параметры потоков солнечного ветра от одних и тех же корональных источников могут меняться в связи с тем, что физические характеристики источников зависят от уровня солнечной активности. Ермолаев и соавторы [10] предложили свою классификацию, удобную для изучения геоэффективности потоков солнечного ветра. Хундхаузен [11] ранее предлагал классификацию, основанную на временном масштабе явлений в солнечном ветре, и выделил 7 классов.

Потоки солнечного ветра проявляют мелкомасштабную структуру с характерными временами секунд и минут по измеряемым параметрам: скорость, плотность и температура протонов, модуль и направление компонент межпланетного магнитного поля. Мелкомасштабная структура создается турбулентностью потоков солнечного ветра, наличием дискретных струй, взаимодействием потоков солнечного ветра от различных корональных источников [12–15].

Важным параметром, характеризующим источники солнечного ветра, является ионный состав плазмы, задаваемый такими параметрами, как отношение плотностей ионов кислорода O^{7+}/O^{6+} , углерода C^{6+}/C^{5+} , средний заряд ионов железа (Q_{Fe}), а также отношение плотностей Fe/O , характеризующее баланс элементов с низким и высоким потенциалом ионизации (*FIP*-эффект). Зарядовый состав солнечного ветра создается в солнечной короне в условиях столкновительного баланса между процессами ионизации и рекомбинации и “замораживается” в области низкой плотности короны ($R \sim 2-5R_{sun}$), где скорости столкновительных переходов становятся пренебрежимо малыми [3, 16]. Таким образом, ионный состав непосредственно связан с процессами формирования потоков ветра в источниках и является важным параметром их крупномасштабного описания.

В последнее время уделяется большое внимание исследованиям взаимодействия потоков в гелиосфере [17–22]. Магнитогидродинамическое взаимодействие потоков типа ВСП-КВМ и КВМ-КВМ приводит к образованию комплексных транзиентных структур, в которых параметры солнечного ветра и их вариации могут сильно отличаться от их значений в исходных потоках. Например, изменяются крупномасштабные свойства потоков, в частности, в 2–3 раза увеличивается длительность транзиента [23], а также могут возникать мелкомасштабные вариации на временах порядка минут, связанные именно с особенностями взаимодействия.

Моделирование взаимодействующих потоков представляет сложную задачу, поскольку процесс взаимодействия в гелиосфере недоступен для не-

посредственного наблюдения. При МГД-моделировании потоков в солнечной короне в качестве исходных используются данные, получаемые из наблюдений короны Солнца в вакуумно-ультрафиолетовой области спектра и экстраполяции в корону фотосферного магнитного поля [24, 25]. Результаты моделирования сравниваются с наблюдениями солнечного ветра вблизи Земли или других планет [26]. При этом необходимым дополнением анализа крупномасштабной структуры солнечного ветра, связанной с источниками потоков, является рассмотрение мелкомасштабных вариаций, характеризующих их взаимодействие. В качестве параметров для описания мелкомасштабных структур, возникающих в результате магнитогидродинамического взаимодействия, удобно использовать сочетания скорости, плотности, температуры протонов и модуля магнитного поля, классифицируемые как МГД-типы солнечного ветра.

В настоящей работе проводится сопоставление классического описания крупномасштабной структуры потоков солнечного ветра, в интервалах часов и дней, и мелкомасштабной структуры МГД-типов ветра в интервалах минут. На примерах двух событий 24-го солнечного цикла в августе 2010 и мае 2011 г. анализируются особенности структуры солнечного ветра, связанные с источниками потоков и взаимодействием в гелиосфере.

2. ДАННЫЕ О СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ И МЕТОДЫ ИХ АНАЛИЗА

В настоящей работе рассматриваются данные измерений параметров солнечного ветра, представленные в базе данных спутника *ACE* на сайте <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/> и сводной базе данных *OMNIWeb* на сайте <https://omniweb.gsfc.nasa.gov>. Из базы данных *ACE* использованы часовые данные скорости, плотности, температуры протонов, модуля магнитного поля, а также часовые параметры ионного состава O^{7+}/O^{6+} и среднего заряда ионов железа (Q_{Fe}). Из базы *OMNI* взяты минутные данные о скорости, плотности, температуре протонов и модуле магнитного поля. Следует учесть, что данные базы *OMNI* представляют собой компиляцию данных измерений на космических аппаратах *Geotail*, *IMP-8*, *ACE*, *Wind*, полученную с учетом временных сдвигов из-за разницы в положениях аппаратов.

2.1. Крупномасштабные структуры солнечного ветра. Классификация крупномасштабных структур солнечного ветра подробно изложена в работах Ермолаева и соавторов [27]. Рассматриваются следующие типы крупномасштабных структур: быстрые и медленные течения солнечного ветра, гелиосферный токовый слой (HCS), магнитные облака (MC), проявления КВМ в меж-

планетном пространстве (ICME или Ejecta), область сжатия (Sheath) перед Ejecta, Sheath перед MC, область взаимодействия быстрого и медленного ветра (CIR), разреженная область (RARE) и межпланетная ударная волна (IS).

В настоящей работе анализ проводится по данным о солнечном ветре, полученным в период роста 24-го цикла активности (2010–2011 гг.). При рассмотрении крупномасштабных свойств транзиентов, связанных со спонтанной солнечной активностью, в качестве исходных данных использовался каталог МКВМ, составленный Ричардсоном и Кейн (PK каталог, на сайте <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>). Мы брали часовые данные параметров солнечного ветра (протонная скорость, плотность, температура, магнитное поле и ионный состав) с аппаратов *ACE* и *Wind*. Для идентификации направленных на Землю КВМ мы использовали базы данных CDAW (сайт: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/), SEEDS (сайт: <http://spaceweather.gmu.edu/seeds/>) и CACTus (сайт: <http://sidc.oma.be/cactus/>). Для определения взаимосвязи между параметрами МКВМ и их солнечными источниками, были рассмотрены временные границы МКВМ из каталога РК, определенные по таким параметрам, как повышенное значение протонной скорости и магнитного поля, падение температуры протонов ниже ожидаемой по их скорости, а также параметры ионного состава плазмы (отношение O^{7+}/O^{6+} , средний заряд ионов железа $\langle Q_{Fe} \rangle$). Отметим, что в каталоге РК границы МКВМ определяются по плазменно-кинетическим параметрам, и во многих случаях отличаются от границ, устанавливаемых по ионному составу.

Процедура идентификации источников на Солнце включала несколько этапов. Исходя из времени прихода МКВМ в точку L1, по скорости потока определялись временные рамки выхода потоков из областей источников на Солнце в интервале ± 24 ч и подбирались список возможных КВМ. Вторым шагом было выделение из этого списка КВМ, направленных в сторону Земли. Для этого мы использовали изображения с коронографов на аппаратах *STEREO*. В период 2010–2012 гг. оба аппарата *STEREO* были расположены приблизительно в квадратуре по отношению к Земле с отклонением меньше 40 градусов. Мы выбирали КВМ так, чтобы они появлялись в *STEREO-A* на восточном и в *STEREO-B* на западном солнечном лимбе в пределах 1 ч по времени, пересекая при этом плоскость эклиптики. Таким образом, отбирались КВМ, которые распространялись по направлению к Земле в плоскости эклиптики. Дополнительно учитывались данные с коронографа *LASCO* на аппарате *SOHO*. Кроме КВМ учитывались и другие крупномасштабные

структуры солнечного ветра, такие как коротирующая область взаимодействия между медленным ветром и ВСП, и гелиосферный токовый слой, которые могут повлиять на КВМ и изменить параметры ветра, наблюдаемого у Земли.

В результате анализа были выявлены 23 транзиента в период с января 2010 г. по август 2011 г. и были определены их возможные солнечные источники [23]. В 12 случаях транзиенты имели один источник (SS), в 11 случаях одному и тому же транзиенту соответствовали два и более возможных источников (MS). События с несколькими возможными источниками (MS-события) подразделяются на: (1) структуры, образующиеся в результате прихода нескольких следующих друг за другом КВМ (слабое взаимодействие КВМ-КВМ) (MS1); (2) структуры, образующиеся при наложении двух или более КВМ в гелиосфере (сильное взаимодействие КВМ-КВМ) (MS2); и (3) комплексные участки взаимодействия, образующиеся при взаимодействии КВМ с ВСП (MS3).

В событиях с несколькими источниками в солнечном ветре наблюдались комплексные структуры, отличающихся по параметрам от событий с одним источником. В случае слабого КВМ-КВМ взаимодействия профили кинетических параметров плазмы и ионного состава (C^{6+}/C^{5+} , O^{7+}/O^{6+} , Fe/O и средний заряд ионов железа) могут содержать несколько пиков, связанных с последовательным прохождением КВМ. В случае сильного КВМ-КВМ взаимодействия [23], пики в профиле ионного состава, соответствующие КВМ, появляются раньше относительно участков, где температура протонов ниже ожидаемой (один из признаков КВМ). В случае КВМ-ВСП взаимодействия измеренный профиль ионного состава зависит от последовательности прихода потоков и параметров их источников на Солнце.

2.2. МГД-типы солнечного ветра. При рассмотрении мелкомасштабных свойств потоков солнечного ветра была использована схема, состоящая из следующих элементов количественной классификации солнечного ветра вблизи орбиты Земли с ориентировкой на типичные значения скорости V (быстрый–медленный), температуры T (горячий–холодный) и плотности n (плотный–разреженный) протонов. Ранее в [28] был проведен анализ данных с часовым разрешением базы OMNIWeb за 20–23 солнечных цикла. Полученные при этом величины для средних, медианных и наиболее вероятных значений V , T и n , а также плазменного параметра для протонов $\beta = (8\pi n k_B T) / B^2$, где B – величина магнитного поля, k_B – постоянная Больцмана, представлены в табл. 1. Средние и медианные значения для 2010 и 2011 гг., полученные по данным OMNIWeb с 1-минутным разрешением, показаны в табл. 2.

Таблица 1

Величина	V , км/с	T , тыс. К	n , см ⁻³	β
Среднее значение	430	83	5.4	0.43
Медиана	420	85	5.3	0.48
Мода	370~390	72~94	4.3~5.3	0.44~0.65

Таблица 2

Величина		V , км/с	T , тыс. К	n , см ⁻³	β
2010 г.	Среднее значение	410	75	5.6	0.66
	Медиана	380	53	4.4	0.48
2011 г.	Среднее значение	420	91	5.4	0.62
	Медиана	400	64	4.1	0.44

Поскольку удобнее производить классификацию, основываясь на округленных и фиксированных числовых значениях, мы в настоящей работе считали солнечный ветер быстрым, если $V > 450$ км/с, и медленным, если $V < 400$ км/с; горячим, если $T > 10^5$ К, и холодным, если $T < 7.5 \cdot 10^4$ К; плотным, если $n > 6$ см⁻³, и разреженным, если $n < 5$ см⁻³. Средние и медианные значения из табл. 1 находятся внутри этих интервалов исключения. При классификации потоков солнечного ветра по намагниченности с помощью параметра β за основу было взято его единичное значение с интервалом исключения $\pm 10\%$. Таким образом, ветер считался намагниченным при $\beta < 0.9$ и ненамагниченным при $\beta > 1.1$. При классифицировании типов ветра были отобраны те данные, для которых одновременно имелись измерения V , T , n и B . Типы обозначаются по начальным буквам их

англоязычных наименований (fast–slow, hot–cold, dense–rarefied, magnetized–non-magnetized). В итоге получается 16 МГД-типов, которые перечислены в табл. 3. Также выделен неопределенный тип, куда относится ветер, для которого хотя бы один параметр попадает в соответствующий интервал исключения.

Частота встречаемости разных типов различна (табл. 3). Она меняется в зависимости от фазы цикла солнечной активности. Зачастую (но не всегда) наиболее распространены являются типы scdm, scrn и fhrm. Ненамагниченные типы ветра ассоциированы с длительными потоками из корональных дыр и с более высокой частотой встречаются на спаде солнечной активности. Из намагниченных типов достаточно часто встречаются быстрые холодные плотные потоки, связанные с КВМ (fcdm) и менее часто – медленные потоки типов shdm и shrm. Условно перечисленные в табл. 3 типы солнечного ветра обозначены цифрами от 1 до 17.

Следует отметить, что используемая нами параметризация типов ветра была получена на основе типичных (средних и медианных) значений параметров для 20–23 циклов активности, известных из литературы [28]. В дальнейшем предполагается определить изменение частотности МГД-типов в зависимости от уровня солнечной активности.

3. ОСОБЕННОСТИ КРУПНО-И МЕЛКОМАСШТАБНОЙ СТРУКТУРЫ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ПОТОКОВ

Для демонстрации особенностей структуры солнечного ветра, выявляемых при “классиче-

Таблица 3

		Тип	Номер	2010	2011	1995–2017	
Намагниченный		fhdn	17	0.58	1.3	2.5	
		fhrm	16	11.0	11.2	14.4	
		fcdm	15	0.30	0.96	0.90	
		fcrn	14	3.6	4.4	4.4	
		shdm	13	0.47	0.76	0.93	
		shrm	12	0.60	1.7	0.72	
		scdm	11	18.0	13.8	18.3	
		scrn	10	19.4	18.4	10.7	
	Ненамагниченный		fhdn	9	0.57	0.81	1.1
			fhrn	8	2.7	3.6	2.7
		fcdn	7	$6.6 \cdot 10^{-2}$	0.12	0.11	
		fcrn	6	$2.9 \cdot 10^{-2}$	$8.5 \cdot 10^{-2}$	$9.8 \cdot 10^{-2}$	
		shdn	5	0.47	0.53	0.42	
		shrn	4	0.24	0.16	$7.9 \cdot 10^{-2}$	
		scdn	3	4.1	2.2	3.2	
		scrn	2	0.83	0.55	0.40	
Неопределенный		–	1	37.1	39.4	39.0	

ском” и МГД-подходах были проанализированы два события, в которых происходило взаимодействие нескольких потоков солнечного ветра.

3.1. Событие 3–5.VIII.2010. Событие 3–5.VIII.2010 (3.VIII.2010 18.00–5.VIII.2010 08.00) является примером КВМ–КВМ взаимодействия. Наиболее вероятными источниками являются 2 КВМ, зафиксированные в коронографе 1.VIII.2010 в 03.54/04.24 и в 08.24/08.54 соответственно (по данным каталога SEEDS). Второй КВМ (скорость 1100/906 км/с по измерениям *STEREO-A,-B*) нагнал первый (скорость 670/528 км/с по *STEREO-A,-B*).

На рис. 1 показана крупномасштабная (ионный состав) и мелкомасштабная (скорость, плотность, температура протонов и модуль магнитного поля) структуры солнечного ветра, наблюдавшегося в период с 3 по 6.VIII.2010. По характеру структуры в ветре можно выделить четыре участка: (1) – с 00.00 по 18.00 3.VIII.2010; (2) – с 18.00 3.VIII.2010 по 04.00 4.VIII.2010; (3) – с 04.00 4.VIII.2010 по 08.00 5.VIII.2010; (4) – с 08.00 5.VIII.2010 по 00.00 6.VIII.2010 (все времена в UT).

1-й участок содержит хвост высокоскоростного потока от КД, пришедшего к Земле 27.VII. 2-й участок начинается с ударной волны, образующейся приходом первого КВМ, за которым следует область сжатия (sheath). 3-й участок соответствует области взаимодействия первого и второго КВМ. В структуре наблюдается 2 пика для плотности и магнитного поля. В ионном составе тоже можно выделить 2 пика для O^{7+}/O^{6+} и заряда железа. Первый пик соответствует первому КВМ, второй – второму, более быстрому КВМ.

4-й участок начинается с падения плотности, модуля магнитного поля и среднего заряда ионов Fe до фоновых значений при умеренных значениях скорости и температуры протонов, но в конце этого участка отмечается рост параметра β до величины порядка 3, что характерно для высокоскоростного потока. При этом, 3–4 дня ранее на изображениях Солнца корональные дыры отсутствовали, поэтому источник этого возмущения остался неопределенным.

Наиболее интересен для анализа участок 2 – область сжатия между ударной волной и МКВМ. В мелкомасштабной структуре этого участка, особенно, в параметре β (рис. 2), заметны несколько интервалов периодических неоднородностей. Расстояние между центральными пиками с большим периодом приблизительно 100 мин, с малым периодом – 20–30 мин (Первая группа пиков: 3.VIII.2010 в 20.00, 20.15 и 20.27. Вторая группа: 3.VIII.2010 в 21.39, 21.59 и 22.17. Третья группа: 3.VIII.2010 в 23.11, 23.32 и 23.51).

На графиках плотности и модуля магнитного поля эти неоднородности тоже присутствуют, но значительно менее контрастны, причем измене-

ния плотности и модуля магнитного поля происходят в противофазе. На графиках скорости и температуры протонов видны только колебания с большим периодом.

На рис. 3а показаны гистограммы распределений МГД-типов солнечного ветра для участков 1–4 события 3–5.VIII.2010. По шкале абсцисс указан номер типа (согласно табл. 3), по шкале ординат – доля этого типа потока в рамках рассматриваемого участка. Ветер на участке 1 относится к неопределенному МГД-типу, что соответствует потоку медленного ветра. На участке 2 (область сжатия) видны 2 горячие быстрые плотные компоненты потока: fhdm и fhdm, различающиеся намагниченностью (~60 и 20%). Можно сказать, что это потоки типа fhd* с неоднородностями по параметру магнитного поля β . 3-й участок (комплексный МКВМ) имеет одну компоненту быстрого холодного намагниченного потока с переменной плотностью (fcdm, fcrm) (80%). На участке 4 наибольшая компонента – медленный ветер (40%), а также меньший поток (30%) быстрого горячего разреженного ветра (fhgn) и два слабых потока (в сумме около 30%) быстрого разреженного намагниченного ветра с температурой выше и ниже границы разделения (fhgm, fcrm).

Таким образом, область сжатия (2) – это горячие быстрые и плотные потоки с неоднородностями, в которых превалирует магнитное и плазменное давление – сжатые потоки с разных участков, отличающихся модулем магнитного поля, а область 3 (МКВМ) – быстрые холодные (по кинетической температуре) намагниченные структуры с неоднородностями в плотности.

3.2. Событие 27–30.V.2011. Событие 27–30.V.2011 (27.V. 09.00–30.V.2011 00.00) является примером КВМ–ВСП взаимодействия. Наиболее вероятными источниками данной комплексной структуры являются КВМ и КД. На рис. 3б показана крупномасштабная (ионный состав) и мелкомасштабная (скорость, плотность, температура протонов и модуль магнитного поля) структуры солнечного ветра, наблюдавшегося в период с 27 по 30.V.2011. По характеру структуры в ветре можно выделить четыре участка: (1) – с 00.00 по 09.00 27.V, (2) – с 09.00 27.V по 06.00 28.V, (3) – с 06.00 28.V по 23.00 28.V, (4) – с 23.00 28.V по 00.00 30.V (все времена в UT).

Согласно модельным расчетам, в рассматриваемом событии произошло взаимодействие КВМ с ВСП от экваториальной корональной дыры (КД). 1-й участок, по-видимому, это часть гелиосферного токового слоя, так как 26.V в 11 ч произошла смена секторов магнитного поля. 2-й участок – 1-я часть ВСП из КД. 3-й участок соответствует МКВМ, что видно по температуре, магнитному полю и ионному составу. Наблюдается ярко выраженный пик для O^{7+}/O^{6+} и заряда железа. Приход 2-й части

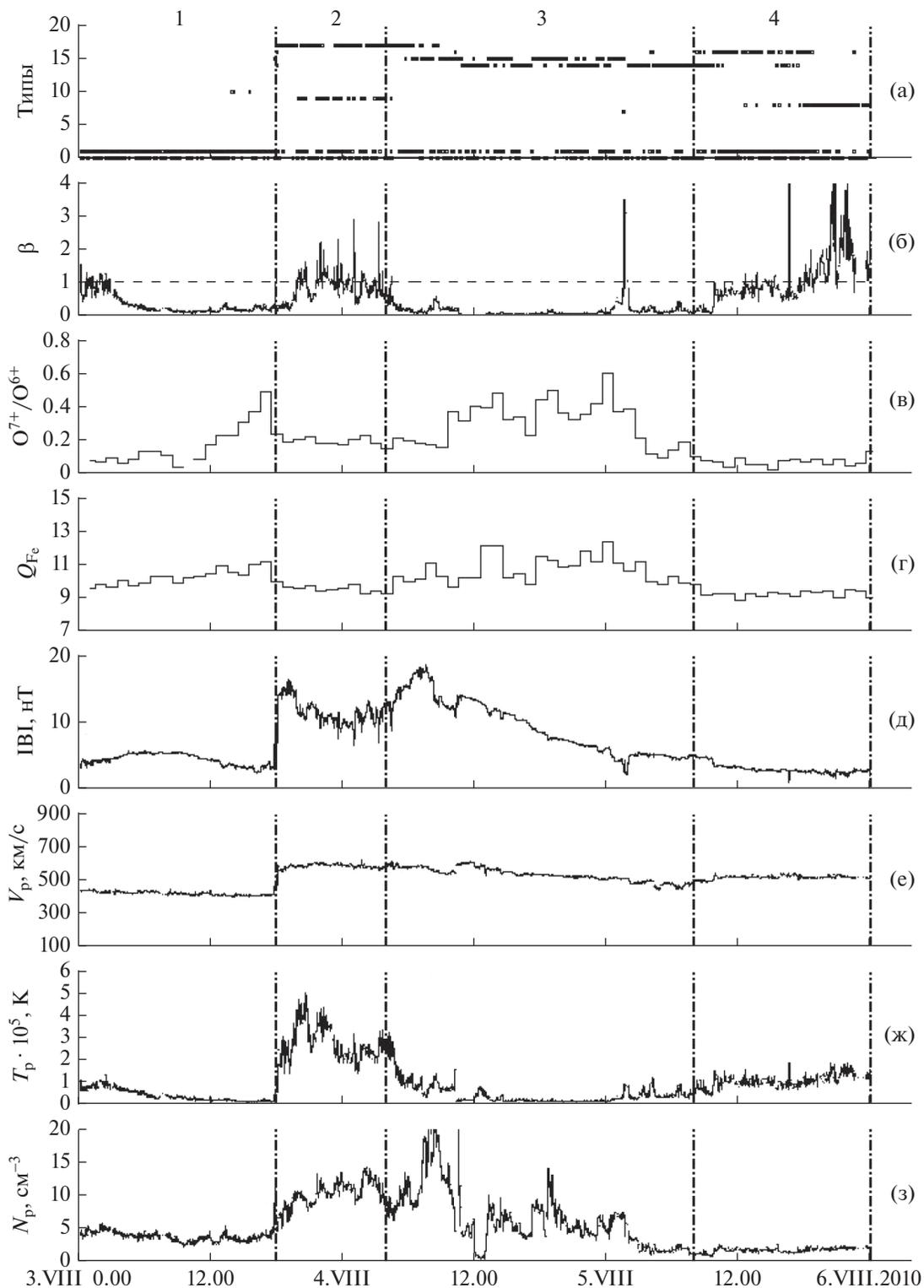


Рис. 1. Параметры и тип солнечного ветра для события 3–5.VIII.2010. Сверху вниз: а) типы потоков (fhdm-17, fhrm-16, fcdm-15, fcrn-14, shdm-13, shrm-12, scdm-11, scrm-10, fhdn-9, fhrn-8, fcdn-7, fcrn-6, shdn-5, shrn-4, scdn-3, scrn-2, “неопределенный тип” – 1, отсутствие данных по какому-либо из параметров – 0), б) β по минутным данным OMNIWeb, в) отношение ионов O^{7+}/O^{6+} , часовые данные, г) заряд железа, часовые данные, д) магнитное поле, минутные данные, е) протонная скорость, минутные данные, ж) протонная температура, минутные данные, з) протонная плотность, минутные данные.

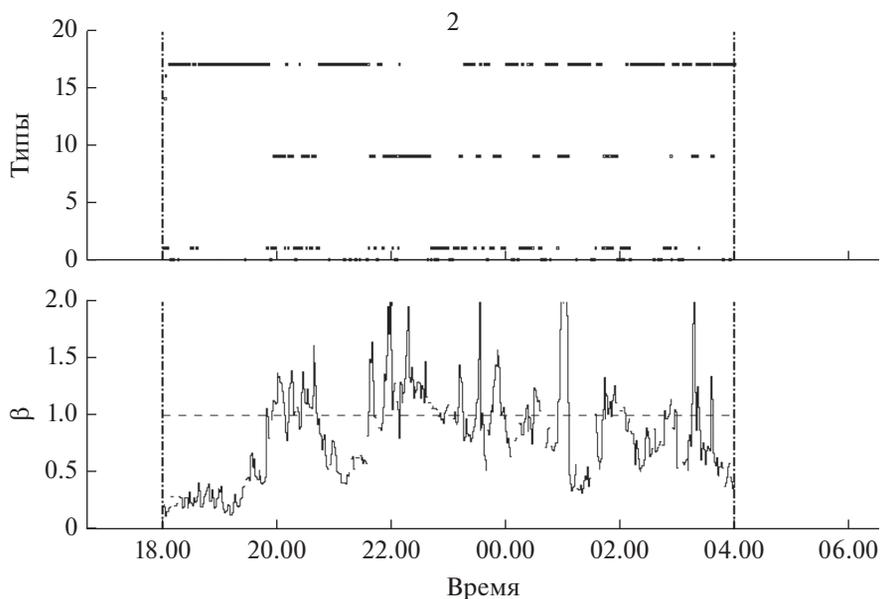


Рис. 2. Мелкомасштабная структура солнечного ветра для события 3–5.VIII.2010 на участке 2 (тип ветра и параметр β).

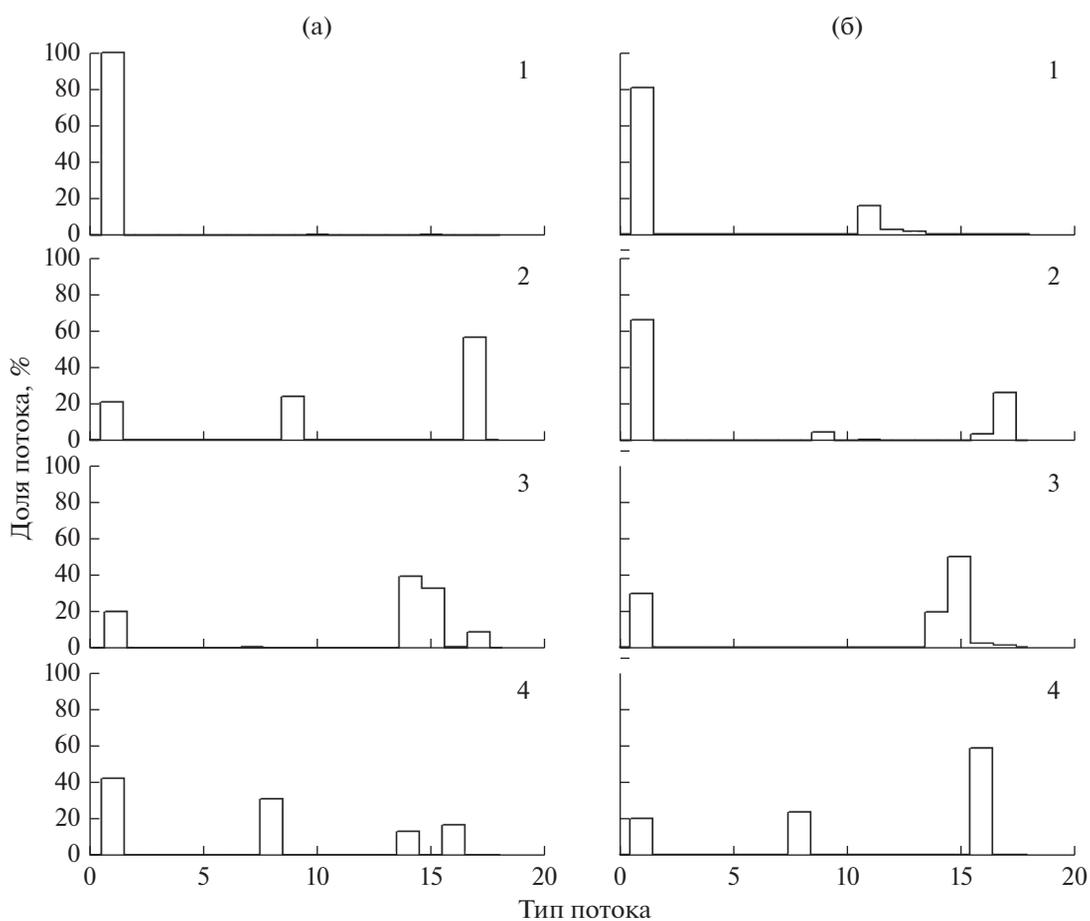


Рис. 3. Гистограммы МГД-типов солнечного ветра для событий 3–5.VIII.2010 (а) и 27–30.V.2011 (б).

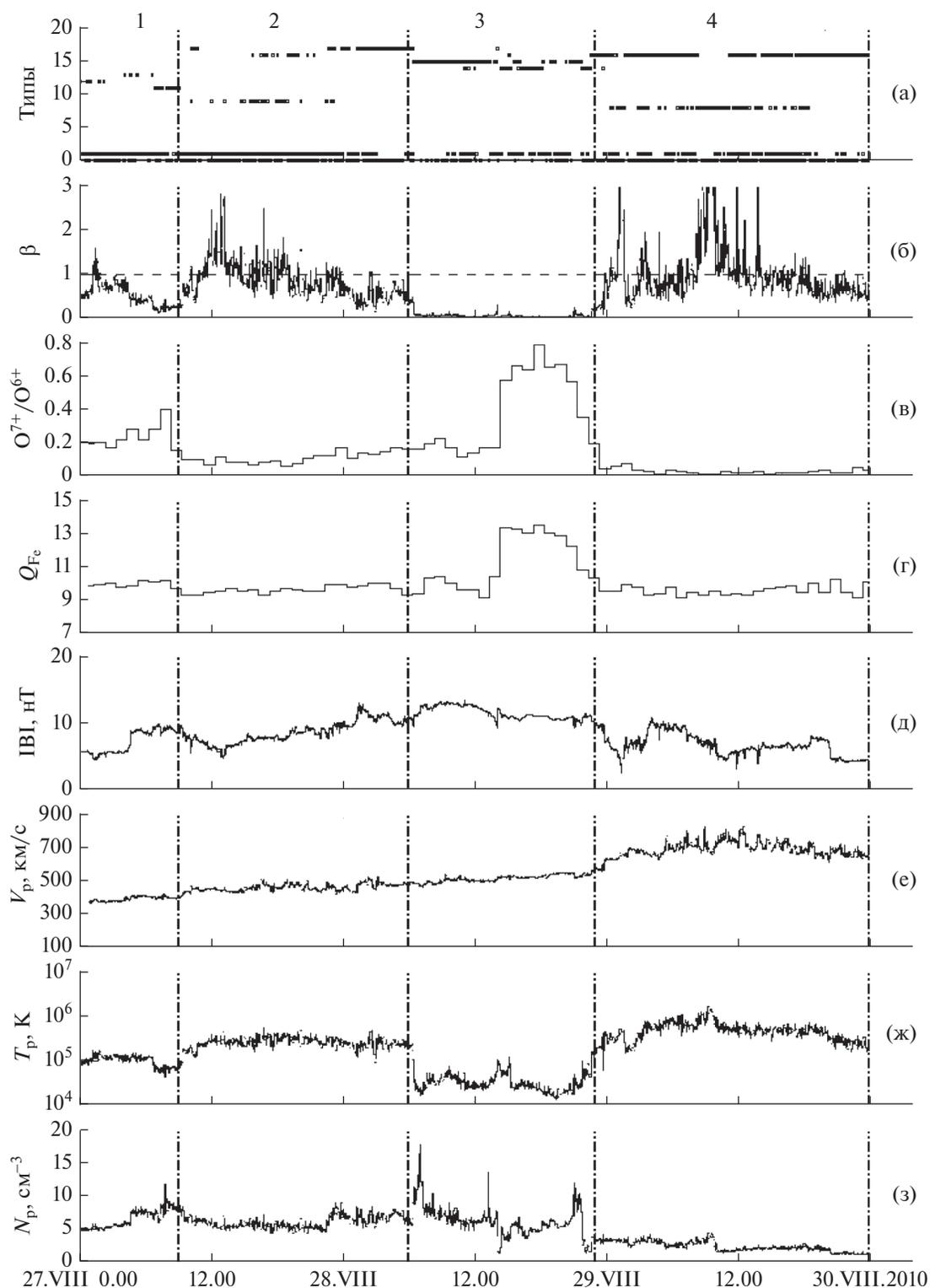


Рис. 4. То же, что на рис. 1, но для события 27–30.V.2011.

ВСП СВ виден по подъему в скорости и спаду в ионном составе на 4-ом участке. За ВСП СВ на 2-м и 4-м участках ответственна обособленная трансэкваториальная КД, которая располагалась на центральном меридиане 23–25.V.2011 (рис. 4).

Один из возможных источников МКВМ это КВМ, зафиксированный на Солнце 24.V.2011 в 15.54/16.24 (со скоростями 640/657 км/с) по данным каталога SASTus. Источником также могут быть два КВМ 25.V.2011 в 05.24/05.54 (со скоро-

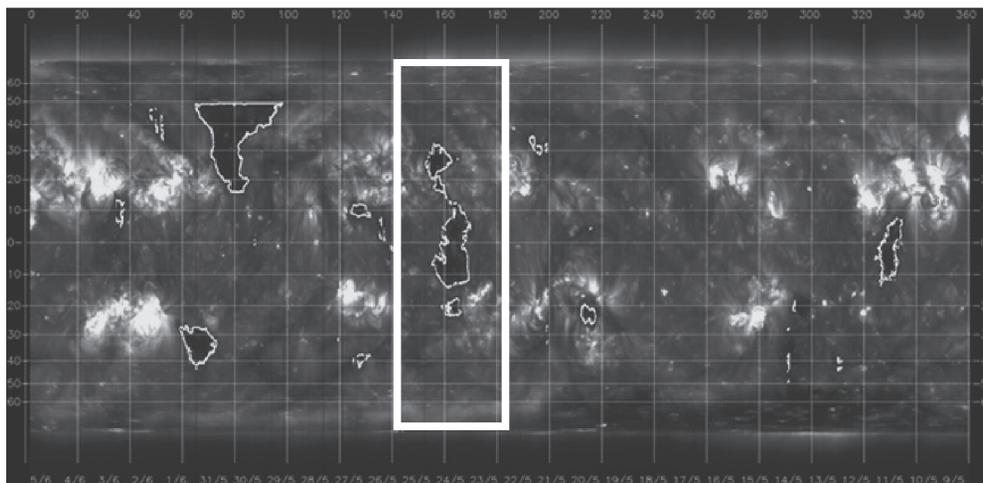


Рис. 5. Синоптическая карта Солнца за период с 9.V.2011 по 5.VI.2011. Белой рамкой выделена КД, которая была потенциальным источником ВСП СВ.

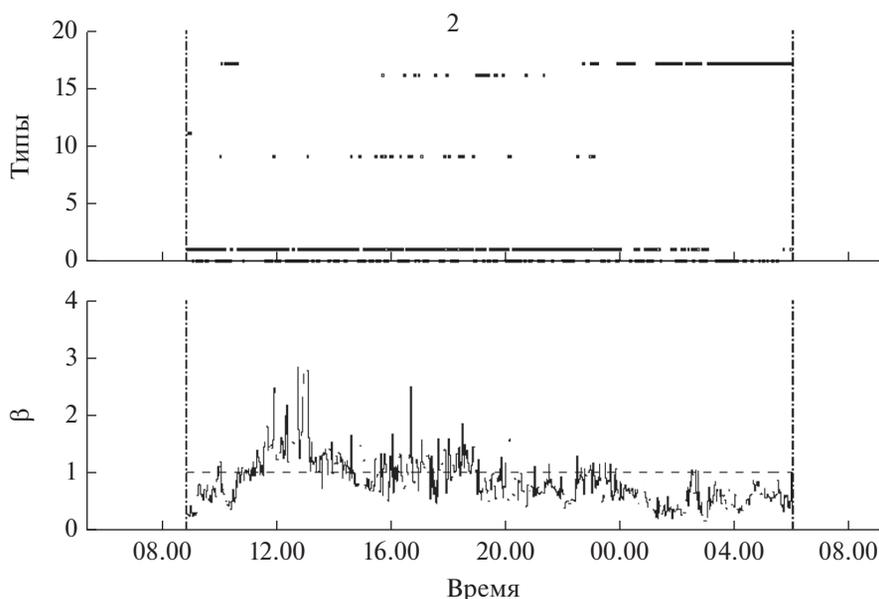


Рис. 6. Мелкомасштабная структура солнечного ветра (тип ветра и параметр β) для события 27–30.V.2011 на участке 2.

стями 1010/655 км/с) и 25.V.2011 в 13.24/13.24 (со скоростями 712/593 км/с) по данным каталога SEEDS. Также 25.V.2011 в базе данных SolarDemon (<http://solar demon.oma.be/>) зафиксирована серия слабых вспышек в активной области AR11216. Если считать, что КВМ 25.V.2011 распространяются по ВСП, прогноз для скорости которого был 545 км/с, то используя модель DBM [29], получаем время прихода первого МКВМ 27.V.2011, 13.00 при скорости 660 км/с, что раньше и быстрее, чем измеренные значения 28.V.2011, 05.00, скорость ~540 км/с. Но если учесть возможное месторасположение источника AR11216 (S15W40) впереди КД, то возможно, что сам КВМ распро-

странялся по медленному ветру, а потом около Земли вошел в ВСП. Это подтверждается и моделированием с помощью модели WSA-ENLIL Cone [30]. При распространении КВМ по медленному ветру ~350 км/с, мы получаем приход МКВМ 28.V.2011, 01.00, со скоростью 490 км/с, что лучше согласуется с измерениями. Однако, возможно, что часть пути МКВМ прошел по ВСП. Что касается второго КВМ (25.V.2011 в 13.24/13.24), то он распространялся по быстрому КВМ и, скорее всего, догнал его, когда тот затормозился на медленном ветре. Если учесть, что второй КВМ распространялся по замедлившемуся первому КВМ (500 км/с) с начальной скоростью 652 км/с, то его приход про-

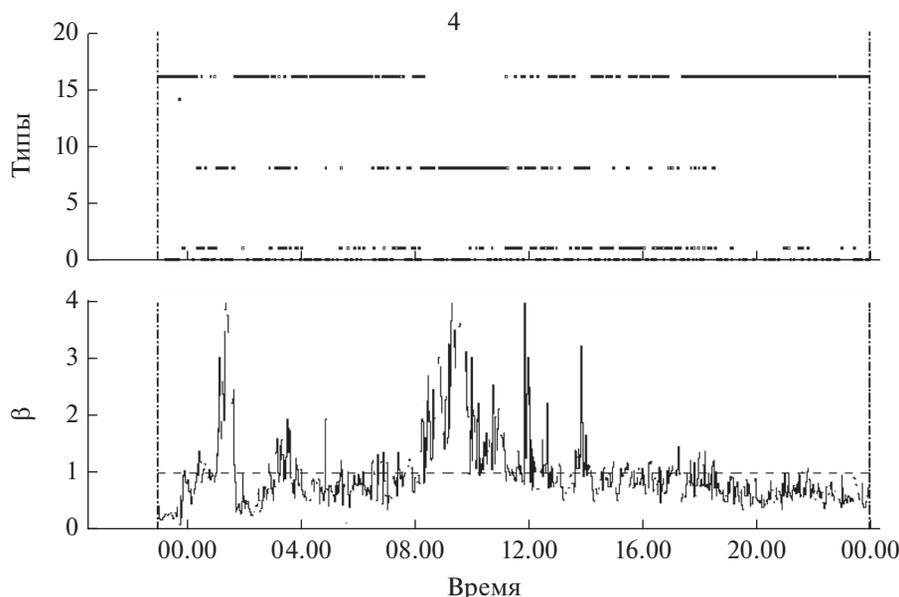


Рис. 7. Мелкомасштабная структура солнечного ветра (тип ветра и параметр β) для события 27–30.V.2011 на участке 4.

гнозируется 28.V.2011, 08.00 со скоростью 560 км/с, что хорошо укладывается в наблюдаемые параметры.

В отличие от предыдущего случая, в событии 27–30.V.2011 на границе участков 2 и 3 отсутствовала ударная волна, поскольку скорости ВСП и налетающего КВМ были близкими.

На рис. 3б показаны гистограммы распределений МГД-типов солнечного ветра для участков 1–4 события 27–30.V.2011. На участке 2, предшествующем приходу МКВМ, более 65% составлял медленный ветер. Из быстрых потоков наблюдались два типа: при $\beta < 1$ порядка 25% составлял быстрый горячий плотный намагниченный (17-fhdm) и при $\beta > 1$ – около 5% – быстрый горячий плотный ненамагниченный (9-fhdn). В области 4, соответствующей второй части ВСП, доминировал (более 60%) быстрый горячий разреженный намагниченный поток (fhgm-16), соответствующий $\beta < 1$, в то время, как быстрый горячий разреженный ненамагниченный поток (fhrn-8), характерный для ВСП с $\beta > 1$, составлял только 25%. Участок 3, соответствующий МКВМ, похож на такой же участок в событии 3–5.VIII.2010, но быстрый холодный плотный замагниченный поток (fcdm-15) наблюдается более длительное время, чем его менее плотная часть (fcrn). Такая картина соответствует тому, что признаки ВСП ($\beta > 1$) проявлялись только на небольших временных отрезках, а в основной части области взаимодействия присутствовала замагниченная плазма с параметрами, характерными для КВМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрены два способа классификации структур солнечного ветра – в масштабе порядка часов и дней по плазменно-кинетическим параметрам и в масштабе минут по МГД-параметрам. На примерах событий 3–5.VIII.2010 и 27–30.V.2011 показано, что оба описания дополняют друг друга и позволяют точнее понять особенности структур солнечного ветра, возникающих при взаимодействии потоков типа КВМ-КВМ и ВСП-КВМ.

2. Анализ солнечного ветра в области взаимодействия КВМ-КВМ в событии 3–5.VIII.2010 показал, что МГД-типы мелкомасштабной структуры области в основном соответствуют крупномасштабному описанию (ударная волна–область сжатия–МКВМ), однако в области сжатия в распределении параметра плазмы β обнаружены неоднородности с периодами порядка 20–30 и 100 мин. Эти неоднородности соответствуют чередованиям МГД-типов быстрого горячего плотного намагниченного и ненамагниченного ветра.

3. В событии 27–30.V.2011, в котором поток ВСП был разделен приходом одного или нескольких КВМ, было найдено, что в участке 2 перед МКВМ наблюдались потоки быстрого горячего плотного намагниченного (25%) и ненамагниченного (5%) ветра. Повышение плотности ВСП, очевидно, было связано с его сжатием КВМ. После МКВМ, на участке 4, доминировал быстрый горячий разреженный намагниченный поток (60%), а быстрый горячий разреженный ненамагниченный поток, характерный для ВСП, составлял 25%. Таким образом, хотя крупномасштабная структура области взаимодействия в целом соот-

ветствовала присутствию потоков ВСП и КВМ, в мелкомасштабной структуре вследствие взаимодействия с КВМ ВСП проявлялся только на небольших временных отрезках.

Авторы выражают глубокую благодарность научным коллективам проектов SDO/AIA, SDO/HMI, ACE и OMNIWeb за предоставление доступа к данным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Паркер Е.Н.* Динамические процессы в межпланетной среде. М.: Мир, 1965.
2. *Richardson I.G., Cane H.V.* Near-earth solar wind flows and related geomagnetic activity during more than four solar cycles (1963–2011) // *J. Space Weather Space Clim.* 2012. V. 2. A02.
3. *Feldman U., Landi E., Schwadron N.A.* On the sources of fast and slow solar wind // *J. Geophysical Research: Space Physics.* 2005. V. 110. A07109.
4. *Xu F., Borovsky J.E.* A new four-plasma categorization scheme for the solar wind // *J. Geophysical Research: Space Physics.* 2015. V. 120. P. 70–100.
5. *Cane H.V., Richardson I.G.* Interplanetary coronal mass ejections in the near-Earth solar wind during 1996–2002 // *J. Geophysical Research: Space Physics.* 2003. V. 108. P. 1156.
6. *Galvin A.B., Popecki M.A., Simunac K.D.C. et al.* Solar wind ion trends and signatures: STEREO PLASTIC observations approaching solar minimum // *Annales Geophysicae.* 2009. V. 27. P. 3909.
7. *Richardson I.G., Cane H.V.* Near-Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections During Solar Cycle 23 (1996–2009): Catalog and Summary of Properties // *Solar Phys.* 2010. V. 264. P. 189.
8. *Mason G.M., Desai M.I., Li G.* Solar Cycle Abundance Variations in Corotating Interaction Regions: Evidence for a Suprathermal Ion Seed Population // *Astrophys. J. Lett.* 2012. V. 748. L31.
9. *Gopalswamy N., Makela P., Akiyama S. et al.* The Solar Connection of Enhanced Heavy Ion Charge States in the Interplanetary Medium: Implications for the Flux-Rope Structure of CMEs // *Solar Physics.* 2013. V. 284. P. 17.
10. *Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю.* Относительная частота появления и геоэффективность крупномасштабных типов солнечного ветра // *Космич. исслед.* 2010. Т. 48. № 1. С. 3–32.
11. *Хундхаузен А.* Расширение короны и солнечной ветер. М.: Мир, 1976.
12. *Mullan D.J.* Sources of the solar wind – What are the smallest-scale structures? // *Astronomy and Astrophysics.* 1990. V. 232. № 2. P. 520–535.
13. *Tu C.Y., Marsch E.* MHD structures, waves and turbulence in the solar wind: Observations and theories // *Space Science Reviews.* 1995. V. 73. № 1–2. P. 1–210.
14. *Safrankova J., Nemecek Z., Cagas P. et al.* Short-scale variations of the solar wind helium abundance // *Astrophysical J.* 2013. V. 778. № 1.
15. *Застенкер Г.Н., Колоскова И.В., Рязанцева М.О. и др.* Наблюдение быстрых вариаций содержания ионов гелия в солнечном ветре // *Космич. исслед.* 2014. Т. 52. № 1. С. 27–38.
16. *Hundhausen A.J., Gilbert H.E., Bame S.J.* Ionization state of the interplanetary plasma // *J. Geophys. Res.* 1968. V. 73. P. 5485.
17. *Burlaga L.F., Plunkett S.P., St. Cyr O.C.* Successive CMEs and complex ejecta // *J. Geophysical Research: Space Physics.* 2002. V. 107. P. 1266.
18. *Burlaga L., Berdichevsky D., Gopalswamy N. et al.* Merged interaction regions at 1 AU // *J. Geophysical Research: Space Physics.* 2003. V. 108. P. 1425.
19. *Rouillard A.P., Lavraud B., Sheeley N.R. et al.* White Light and In Situ Comparison of a Forming Merged Interaction Region // *Astrophys. J.* 2010. V. 719. P. 1385.
20. *Liu Y.D., Luhmann J.G., Mostl C. et al.* Interactions between coronal mass ejections viewed in coordinated imaging and in situ observations // *Astrophysical J. Letters.* 2012. 746:L15.
21. *Liu Y.D., Yang Z., Wang R. et al.* Sun-to-Earth Characteristics of Two Coronal Mass Ejections Interacting Near 1 AU: Formation of a Complex Ejecta and Generation of a Two-step Geomagnetic Storm // *Astrophys. J. Lett.* 2014. V. 793. L41.
22. *Temmer M., Vrsnak B., Rollett T. et al.* Characteristics of Kinematics of a Coronal Mass Ejection during the 2010 August 1 CME-CME Interaction Event // *Astrophysical J.* 2012. V. 749. P. 57.
23. *Rodkin D., Zhukov A.N., Goryaev G. et al.* Single ICMEs and Complex Transient Structures in the Solar wind in 2010–2011 // *Solar Physics.* 2018.
24. *Pagano P., Reale F., Orlando S., Peres G.* MHD evolution of a fragment of a CME core in the outer solar corona // *Astron. Astrophys.* 2007. V. 464. P. 753.
25. *Pagano P., Mackay D.H., Poedts S.* Magneto hydrodynamic simulations of the ejection of a magnetic flux rope // *Astron. Astrophys.* 2013. V. 554. A77.
26. *Wold A.M., Mays M.L., Taktakishvili A. et al.* Verification of real-time WSA-ENLIL + Cone simulations of CME arrival-time at the CCMC from 2010 to 2016 // *J. Space Weather and Space Climate.* 2018. V. 8. A17.
27. *Ермолаев Ю.И. и др.* Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // *Космич. исслед.* 2009. № 2. P. 99. (*CosmicResearch.* V. 47. № 1. P. 81.)
28. *Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Veselovsky I.S.* Statistical Characteristics of the Heliospheric Plasma and Magnetic Field at the Earth's Orbit during Four Solar Cycles 20–23 // *Handbook on solar wind: effects, dynamics and interactions / Ed. Johannson H.E.* New York: Nova Science Publishers. 2009. P. 81.
29. *Vrsnak B., Zic T., Vrbanec D. et al.* Propagation of interplanetary coronal mass ejections: The drag-based model // *Solar Phys.* 2013. V. 285. P. 295.
30. *Mays M.L., Taktakishvili A., Pulkkinen A. et al.* Ensemble modeling of CMEs using the WSA-ENLIL + Cone model // *Solar Phys.* 2015. V. 290. P. 1775.