

УДК 523.62-726

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

© 2019 г. И. С. Веселовский^{a, b, *}, К. Б. Капорцева^c, А. Т. Лукашенко^{a, **}

^aНаучно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^bИнститут космических исследований РАН, Москва, Россия

^cФизический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: veselov@dec1.sinp.msu.ru,

**e-mail: a_lu@mail.ru

Поступила в редакцию 04.07.2017 г.

После доработки 22.03.2018 г.

Принята к публикации 14.05.2018 г.

На данный момент нет общепринятой классификации потоков солнечного ветра. Существуют разные подходы к этой проблеме в зависимости от цели исследования. В настоящей статье на основе статистического анализа солнечного ветра представлена бинарная классификация его типов по основным гидродинамическим параметрам (скорость, температура, плотность). Проведен анализ 1-минутных данных OMNIWeb за период с 1996 по 2017 гг., что охватывает 23-й и текущий 24-й солнечные циклы. Выделяются восемь типов солнечного ветра: быстрый-горячий-плотный, быстрый-горячий-разреженный, быстрый-холодный-плотный, быстрый-холодный-разреженный, медленный-горячий-плотный, медленный-горячий-разреженный, медленный-холодный-плотный, медленный-холодный-разреженный. Эти типы встречаются с разной частотой и представляют собой следствия различных проявлений солнечной активности. Повышенный интерес представляют такие потоки солнечного ветра, в которых отличия параметров от средних наиболее значительны.

Ключевые слова: гелиосфера, солнечная активность, солнечный ветер

DOI: 10.1134/S0320930X19010080

ВВЕДЕНИЕ

Давно известно, что солнечный ветер не является перманентным, а состоит из отдельных потоков плазмы с различными гидродинамическими и магнитными характеристиками. Различие между типами потоков носит условный, а не абсолютный характер, поэтому до сих пор отсутствует общепринятая номенклатура, которая оказывается различной у разных авторов. Бывает различно как количество этих типов, так и подход к классификации.

До середины прошлого столетия не было никаких прямых измерений плазмы солнечного ветра. Все суждения основывались только на данных о кометных хвостах, модуляционных эффектах галактических космических лучей, характере распространения солнечных космических лучей, геомагнитной активности и полярных сияниях, но уже тогда было понятно, что гелиосфера не статична. Первые прямые измерения солнечной плазмы позволили определить плотность, а затем и температуру протонов солнечного ветра. В (Snyder и др., 1963) сообщалось о том, что изме-

рения КА Mariner-2 в период с конца августа 1962 г. по январь 1963 г. явно показали существование потоков, которые принципиально отличаются от окружающего солнечного ветра высокой скоростью. В работе делался вывод об изменчивости скорости плазмы солнечного ветра и о существовании в нем крупномасштабных течений. В итоге исследования вариации ГКЛ, солнечной активности и геомагнитных бурь позволили выделить два типа корпускулярных истечений от Солнца: то, что потом Паркер (1965) определил как спокойный ветер (300–500 км/с), и возмущенный солнечного ветра (1000–2000 км/с).

Одним из первых задумался о классификации явлений солнечного ветра Хундхаузен (1976). В своей монографии “Расширение короны и солнечный ветер” он приводит классификацию, в основу которой положено сравнение характерного временного масштаба явления с тремя физическими временными масштабами. В итоге он выделил 7 классов явлений:

1. стационарное однородное расширение короны (по существу, спокойный ветер);

2. нестационарное неоднородное расширение короны;
3. распространяющиеся возмущения с крупномасштабными градиентами давления;
4. распространяющиеся возмущения с последующим приближением к крупномасштабному балансу давлений;
5. конвективные возмущения с крупномасштабным балансом давлений;
6. возмущения, предельно допустимые магнитогидродинамической теорией;
7. плазменные волны и “шумы”.

Несмотря на то, что на данный момент данных по плотности, скорости, температуре, химическому составу и магнитному полю солнечного ветра накопилось достаточно много, единой классификации типов солнечного ветра не существует. Разные авторы подходят к этому вопросу неодинаково, и существует множество вариантов классификации, хотя разделение на квазистационарные и нестационарные потоки общепринято. Так согласно (Gosling, 1996), расширение короны, формирующее солнечный ветер, неоднородно, поскольку модулируется сложной структурой магнитного поля Солнца. При этом крупномасштабную структуру солнечного ветра определяют два типа потоков: 1) коротящие потоки и 2) транзитные возмущения. Первые ассоциированы с пространственными изменениями характера расширения солнечной короны и вращением Солнца, тогда как транзитные возмущения связаны с эпизодическими выбросами вещества в межпланетное пространство. Высокоскоростные потоки в “спокойном” (в смысле, не транзитном) ветре обычно происходят из корональных дыр (Nolte и др., 1976; Wang и др., 1996; Шугай и др., 2017). Низкоскоростные же потоки, как считается, исходят из сравнительно плотных корональных стримеров (см., например, Habbal и др., 1997). Медленный солнечный ветер отличается не только по скорости, он также плотнее и имеет иной ионный состав. В (Лотова, Обридко, 2013) рассматривалась связь типов потоков солнечного ветра со структурой магнитного поля в короне. Вращение Солнца ведет к тому, что высоко- и низкоскоростные потоки взаимодействуют друг с другом в межпланетном пространстве, что приводит к появлению крупномасштабных сжатых структур.

В работах (Richardson и др., 2000; 2001; 2002) солнечный ветер, наблюдавшийся вблизи Земли начиная с 1972 г., был подразделен на три типа потоков с тем, чтобы оценить, в частности, вклад каждого из них в усредненные за длительный (т.е. превышающий период солнечного вращения) интервал времени значения геомагнитных индексов и в межпланетное магнитное поле, а также выделить структуры, ответственные за геомаг-

нитные возмущения. Эти три типа потоков (Richardson и др., 2012) следующие:

1. Коротящие высокоскоростные потоки, скорость солнечного ветра в которых, как правило, превышает 450 км/с, происходящие из корональных дыр на Солнце. На ведущем краю потока происходит формирование области сжатой плазмы – коротящей области взаимодействия (corotating interaction region – CIR), вызванное взаимодействием этого потока с предшествующим более медленным, холодным и плотным ветром.

2. Более медленный “межпотоковый” солнечный ветер, обычно ассоциированный с поясом стримеров.

3. Транзитные потоки, источником которых служат корональные выбросы массы (coronal mass ejection – CME) на Солнце. Условно они названы авторами “CME-ассоциированными потоками”.

Аналогичное подразделение потоков на типы было использовано в обзоре (Marsch, 1999). В (Richardson и др., 2012) описанная классификация была расширена на период с 1963 по 2011 гг.

Для большинства исследователей интерес представляют крупномасштабные возмущенные потоки солнечного ветра, которые являются прямым следствием процессов, происходящих на Солнце и в гелиосфере. К указанным потокам относят межпланетные выбросы корональной массы (interplanetary CME – ICME) с областью сжатия перед ними Sheath, а также CIR. В работах Ю.И. Ермолаева и соавторов проводится разделение ICME на подклассы: Ejecta (“поршень”) и магнитные облака (magnetic cloud – MC), различие между которыми состоит в том, что MC обладают более высоким и более регулярным магнитным полем. Всего ими выделено 6 основных типов крупномасштабных потоков солнечного ветра. К квазистационарным относятся: гелиосферный токовый слой (heliospheric current sheet – HCS), медленный (SLOW) и быстрый (FAST) ветер. К нестационарным: сжатые потоки солнечного ветра (CIR и Sheath), ICME (MC и Ejecta) и область разрежения (RARE) (Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю., 2009) (табл. 1). Позже к этим шести типам добавились еще два кратковременных: ударная волна (IS) и обратная ударная волна (ISA) (Ермолаев и др., 2010).

Событие типа HCS связано с секторной структурой межпланетного магнитного поля (ММП). Кроме одновременной смены знаков компонент магнитного поля B_x и B_y , оно характеризуется наблюдением холодной плазмы с низкой скоростью и высокой плотностью, а также понижением величины магнитного поля. Между течениями SLOW и FAST четкой границы нет, но условно можно считать, что SLOW – более плотная и холодная плазма со скоростью $V < 450$ км/с, а FAST – горячий, разреженный и высокоскоростной поток.

Таблица 1. Классификация типов солнечного ветра по Ю.И. Ермолаеву и соавторам

Квазистационарные типы		Возмущенные типы	
1	Гелиосферный токовый слой, HCS	4	Сжатые потоки солнечного ветра (CIR, область сжатия между FAST и SLOW, и Sheath, область сжатия перед магнитным облаком MC и Ejecta)
2	Медленный ветер из корональных стримеров, SLOW	5	Межпланетный выброс корональной массы ICME (MC и Ejecta)
3	Быстрый ветер из корональных дыр, FAST	6	Область разрежения, RARE

Магнитные облака представляют собой подкласс корональных выбросов массы. Их главной особенностью является наличие характерной внутренней структуры, высокое значение магнитного поля и монотонное вращение его вектора. В связи со всеми этими обстоятельствами магнитные облака являются одними из самых геоэффективных структур солнечного ветра (Бархатов и др., 2014).

Если крупномасштабный объем плазмы с вброженным магнитным полем догоняет более медленный объем плазмы, то на их границе образуется область сжатия, где плазма имеет повышенные значения плотности, температуры и величины поля. В солнечном ветре такой сценарий реализуется в двух случаях. Когда быстрый MC/Ejecta движется в более медленном солнечном ветре, то перед ним образуется область сжатия, получившая, как уже говорилось, название Sheath. Роль своеобразного “поршня” может сыграть и быстрый поток солнечного ветра при наличии достаточно большого градиента скорости, при этом образуется область, получившая название CIR в силу того, что, как правило, быстрые потоки образуются в долгоживущих корональных дырах и демонстрируют короткую, т.е. совместное вращение с Солнцем и появление с периодичностью солнечного оборота в 27 сут (Ермолаев и др., 2009).

В солнечном ветре возможна и обратная ситуация, когда быстрый объем плазмы удаляется от медленного, и в этом случае наблюдается область разрежения с $n < 1 \text{ см}^{-3}$. Образование движущейся полости может быть также связано с выброшенной из конвективной зоны магнитной трубкой с более холодной, чем окружающая среда, плазмой. В этом случае кинетическое давление плазмы и магнитного поля трубки могут быть причиной формирования фронта сжатия, который затем становится фронтальной структурой CME (Еселевич В.Г., Еселевич М.В., 2016).

Такой подход к классифицированию является удобным для изучения геоэффективности различных типов солнечного ветра (Ермолаев и др., 2005). Однако для построения модели солнечного

ветра требуется другой подход, основанный на изучении его основных параметров, таких, к примеру, как скорость, плотность, динамическое давление и температура протонов, величина магнитного поля и др. (Веселовский и др., 2010). Еще один плюс классификации, основанной на отклонениях магнитогидродинамических параметров от среднего — возможность включить в нее кратковременные потоки солнечного ветра длительностью от нескольких минут до нескольких часов. Такие потоки на данный момент малоизучены и вызывают особый интерес. Оба этих подхода не исключают друг друга, и между ними можно провести соответствие.

Гидродинамические параметры определенным образом варьируются в широких пределах, которые зависят от времени и точки наблюдения, отражая тем самым граничные и начальные условия на Солнце, меняющиеся с циклами солнечной активности вместе с ее отдельными проявлениями, которые носят как регулярный, так и спорадический характер. Преобразования гидродинамических параметров происходят на всем пути следования частиц. Амплитуда вариаций колеблется от незначительных малых величин, определяемых пределом чувствительности измерительных приборов до десятков, сотен процентов, а иногда и порядков величин, в особенности для плотности. Объем сведений об этих вариациях достаточно велик для создания исчерпывающе полной бинарной классификации наблюдаемых типов солнечного ветра, что и является целью данного сообщения.

В настоящее время отсутствует общепринятая терминология, а классифицирование продолжает оставаться субъективным, феноменологическим и описательным. Поэтому здесь предлагается простая и универсальная схема, состоящая из следующих элементов количественной классификации относительно некоторых хорошо определенных средних или наиболее вероятных значений по скорости (быстрый—медленный), температуре (горячий—холодный) и плотности (плотный—разреженный). Формально говоря, если имеется k признаков для каждого из m пара-

метров, то число N различных типов потоков будет весьма большим ($N = k^m$). В рассмотренном нами случае $k = 2$, $m = 3$, $N = 8$. Итак, существует восемь различных вариантов, которые мы обозначаем для краткости по начальным буквам англоязычных наименований (fast–slow, hot–cold, dense–rarefied) следующим образом: fhd, fhr, fcd, fcr, shd, shr, scd, scr. Такая номенклатура полностью сохраняет преемственность и устраняет имеющиеся пробелы в существующей терминологии. Следует обратить внимание на то, что бинарная классификация имеет надежное статистическое обоснование, так как плотность, скорость и температура протонов в солнечном ветре подчиняются хорошо известным и определенным распределениям относительно своих средних и наиболее вероятных значений (Веселовский и др., 2010). Указанные восемь типов встречаются не одинаково часто, их относительная доля различна на разных фазах солнечного цикла и в отдельно взятые периоды времени, что отчасти и составляет предмет настоящего исследования. Средние значения (условный “неопределенный” или “нулевой” тип при такой классификации) используются здесь лишь в качестве некоторых опорных величин.

ТИПЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ КРИТЕРИИ ИХ ОТБОРА

Восемь типов солнечного ветра

Тип 1 (fhd). Этот тип чаще всего встречается в максимуме и на спаде солнечной активности. Он наиболее ярко заметен в поршневых ударных волнах после мощных эруптивных солнечных вспышек (Gosling, 1997). Однако он образуется и в области взаимодействия коротирующих быстрых потоков на достаточно большом расстоянии от Солнца, в том числе за орбитой Земли.

Тип 2 (fhr). Весьма распространенный тип – длительные потоки из корональных дыр. На орбите Земли чаще всего встречается при переполюсовке Солнца на ветви спада солнечного цикла и отвечает за рекуррентные геомагнитные возмущения (Mursula и др., 2002).

Тип 3 (fcd). Это довольно редкий и кратковременный тип, встречающийся в некоторых КВМ. Мы предполагаем, что он может возникать вследствие выброса холодного волокна (протуберанца) (см. Yao и др., 2010 и ссылки там). Такого рода выброс может содержать аномально большое количество гелия, приводить к сильному сжатию магнитосферы и необычным магнитным бурям (Dmitriev и др., 2014). Плотность потока массы, импульса и энергии протонов и гелия тогда сравнимы.

Тип 4 (fcr). Области разрежения в хвостовой части высокоскоростных потоков из корональных дыр (см., например, Usmanov и др., 2005). Хо-

лодные магнитные облака в быстром ветре. “Пустые пузыри” (плазмоиды по (Mullan, 1990)). Остатки расширившихся и остывших выбросов. Напомним, что внутри корональных дыр часто видны небольшие эволюционирующие эфемерные активные области.

Тип 5 (shd). По своему характеру этот тип близок к типу scd (см. далее), однако встречается значительно реже.

Тип 6 (shr). Встречается в расширяющихся остатках горячих эруптивных облаков плазмы, подхваченных общим течением. Как и тип 5, чаще наблюдается в районе максимума солнечной активности.

Тип 7 (scd). Обычные представители этого типа – потоки из корональных стримеров и псевдостримеров. Гелиосферные плазменные слои вблизи магнитных секторов (Sanchez-Diaz и др., 2016). Несжатые усиления плотности.

Тип 8 (scr). Часто следует по времени за типом fcr. Расширившиеся, остывшие и заторможенные выбросы.

Экспериментальные данные

Наглядное визуальное представление различных типов солнечного ветра полезно для понимания и быстрой оценки имеющейся ситуации. Нами был рассмотрен период продолжительностью в 22 г., с 1996 по 2017 гг. включительно. При анализе использовались 1-минутные данные OMNI-Web. Данные по трем интересующим гидродинамическим параметрам имелись для 9.18 млн измерений, а пропуски в сумме составили 21% времени. При статистических расчетах, построении графиков распределений и вычислении средних значений пропуски в данных исключались. При изображении изменений гидродинамических параметров с ходом времени и диаграмм чередований типов ветра пропуски аппроксимировались линейными функциями.

Критерии классификации

В качестве критерия количественной классификации по признакам (f–s, h–c, d–r) может быть выбрано отклонение по всем трем основным параметрам (плотность, скорость, температура) в ту или иную сторону от среднего значения, превышающее некоторый порог p , взятый, к примеру, на уровне 10%. При малом значении порога зоны типов солнечного ветра расширяются. При более жестком – сужаются вплоть до исчезновения. Отнесение солнечного ветра к тому или иному типу, кроме того, зависит от периода, за который вычисляются опорные средние значения параметров, а также характера сглаживания данных или его отсутствия.

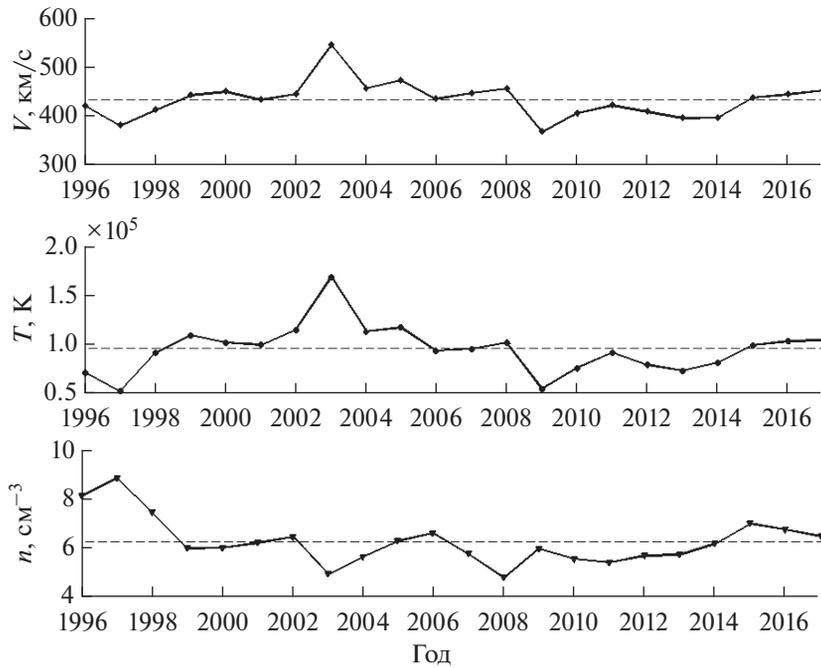


Рис. 1. Среднегодовые значения скорости, температуры и плотности протонов солнечного ветра за период 1996–2017 гг.

ТИПЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В 1996–2017 гг.

Средние за рассмотренный период значения скорости, температуры и плотности протонов солнечного ветра составили, соответственно, $\langle V \rangle = 434$ км/с, $\langle T \rangle = 9.47 \times 10^4$ К, $\langle n \rangle = 6.25$ см⁻³. Эти значения использовались в качестве опорных в проведенном нами общем анализе. Порог, если специально не оговорено иное, полагался равным $p = 10\%$. Какого-либо дополнительного сглаживания данных не проводилось.

Первичный анализ данных показывает (см. рис. 1, а также табл. 2 и 3), что средние значения главных гидродинамических параметров и

частоты встречаемости типов солнечного ветра за указанный период зависели от фазы солнечного цикла, а также указывает на то, что есть определенные различия между 23-м и 24-м циклами активности:

1. 2001 год – максимум солнечной активности (SA) 23-го цикла. Наиболее частыми являлись типы scr, scd и fhr.
2. 2003 год – спад SA. Сильное преобладание типа fhr (почти половина суммарного времени), которому нет полного аналога на спаде 24-го цикла.
3. 2009 год – минимум SA. Доминирует медленный и холодный ветер.

Таблица 2. Распределения типов солнечного ветра по частоте встречаемости в годы 23-го цикла солнечной активности (1996–2008)

№	Тип	Частота встречаемости, %												
		1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
1	fhd	1.4	0.63	1.6	1.9	2.8	3.0	3.3	4.3	3.2	3.0	2.0	1.7	1.1
2	fhr	11	3.2	10	19	18	11	18	49	22	26	22	25	31
3	fcd	0.21	0.58	0.71	0.65	1.4	0.88	0.36	0.93	0.91	0.58	0.12	0.14	0.031
4	fcr	4.0	2.1	2.2	3.2	5.6	5.6	3.1	4.9	4.1	5.7	3.6	4.3	4.1
5	shd	0.52	0.54	1.6	1.1	1.3	1.4	1.1	0.31	0.86	0.90	0.50	0.37	0.31
6	shr	0.14	0.15	1.1	0.88	1.2	1.0	1.2	0.35	0.34	0.50	0.14	0.30	0.23
7	scd	31	44	23	13	11	13	12	4.2	10	15	24	19	13
8	scr	4.3	8.9	11	10	13	14	8.9	2.1	9.0	8.3	11	13	15
0	неопр.	47	40	48	50	46	50	52	34	49	40	37	37	35

Таблица 3. Распределения типов солнечного ветра по частоте встречаемости в годы 24-го цикла солнечной активности (2009–2017)

№	Тип	Частота встречаемости, %								
		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
1	fhd	0.17	0.56	1.2	1.3	1.4	1.3	2.8	2.1	2.9
2	fhr	4.7	13	15	9.0	7.9	6.6	18	24	23
3	fed	4.9×10^{-4}	0.11	0.62	0.26	0.12	0.41	0.79	0.20	0.18
4	fcr	1.3	2.7	3.5	4.8	3.2	2.2	3.8	2.7	4.4
5	shd	0.35	0.57	0.72	0.85	0.69	1.6	1.1	0.95	0.61
6	shr	0.28	0.73	1.5	0.79	1.3	1.2	0.28	0.20	0.27
7	scd	25	19	14	16	18	19	17	20	20
8	scr	29	24	21	21	29	22	9.9	9.5	8.9
0	неопр.	40	39	42	45	38	45	47	41	39

4. 2014 год – максимум 24-го цикла SA. Наиболее частыми были типы scr, scd и fhr.

5. 2015–2017 гг. – спад и минимум 24-го цикла SA. Основным источником возмущенного ветра являлись длительные потоки из низкоширотных корональных дыр, одна из которых существовала на протяжении 24 кэррингтоновских оборотов (Андреева и др., 2018). В этот период наблюдалось повышение доли типа fhr, однако она существенно меньше, чем в 2003 г. Доля типа scr по сравнению с предыдущими годами, напротив, упала более чем вдвое. Более подробно этот интервал времени будет рассмотрен далее.

Таблица 4. Распределения типов солнечного ветра по частоте за период 1996–2017 гг. при различных значениях порога

№	Тип	Частота встречаемости, %			
		$p = 0$	$p = 3\%$	$p = 10\%$	$p = 25\%$
1	fhd	4.48	3.52	1.99	0.610
2	fhr	23.7	21.8	17.8	10.4
3	fed	2.10	1.30	0.469	0.111
4	fcr	10.9	8.09	3.71	0.741
5	shd	3.39	2.41	0.823	0.016
6	shr	4.11	2.67	0.636	0.010
7	scd	25.0	23.0	18.1	5.84
8	scr	26.3	22.5	13.6	1.39
0	неопр.	–	14.6	42.8	80.9

Частоты встречаемости различных типов ветра при различных значениях порога p представлены в табл. 4. При рассмотренных значениях порогов наиболее частыми явились типы fhr, scd и scr (при этом соотношение их долей в зависимости от порога меняется), а “экзотическими” – типы fed, shd и shr. Заметим также, что если при пороге в 10% продолжительность солнечного ветра, относимого к условному “неопределенному” типу, составляла чуть более 40%, то при $p = 25\%$ она превысила 80%. При $p = 50\%$ эта доля достигает почти 97.5%, при этом остается лишь ветер “быстрых” типов: fhr (2.3%), fcr (0.098%), fhd (0.082%) и fed (0.005%). Это одно из проявлений того, что статистические характеристики распределения гидродинамических величин у четырех типов, относимых к одному и тому же классу (например, “горячих” ветров), существенно различаются.

ТИПЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА СПАДЕ И В МИНИМУМЕ 24-ГО ЦИКЛА АКТИВНОСТИ

Можно отметить, что в годы 24-го солнечного цикла (2009–2017) средние значения параметров были ниже, чем в годы 23-го цикла (1996–2008): $\langle V_{23} \rangle = 446$ км/с, $\langle T_{23} \rangle = 1.018 \times 10^5$ К, $\langle n_{23} \rangle = 6.37$ см⁻³, тогда как $\langle V_{24} \rangle = 414$ км/с, $\langle T_{24} \rangle = 8.35 \times 10^4$ К, $\langle n_{24} \rangle = 6.07$ см⁻³. Более подробно статистические характеристики ветра за 2009–2017 гг. приведены в табл. 5. При анализе типов солнечного ветра в 24-м цикле в дальнейшем мы будем использовать в качестве опорных значений средние не за весь период, а $\langle V_{24} \rangle$, $\langle T_{24} \rangle$ и $\langle n_{24} \rangle$, а порог p будет полагаться равным 10%.

Таблица 5. Статистические характеристики солнечного ветра в годы 24-го цикла солнечной активности (2009–2017)

Величина	Среднее значение	Ср. кв. откл.	Медиана	1-я квартиль	3-я квартиль	Мода
Скорость V , км/с	414	94	394	345	463	346
Температура T , тыс. К	83.5	84.9	58.0	30.0	107.1	20.0
Плотность n , см ⁻³	6.07	4.86	4.75	3.11	7.36	3.12

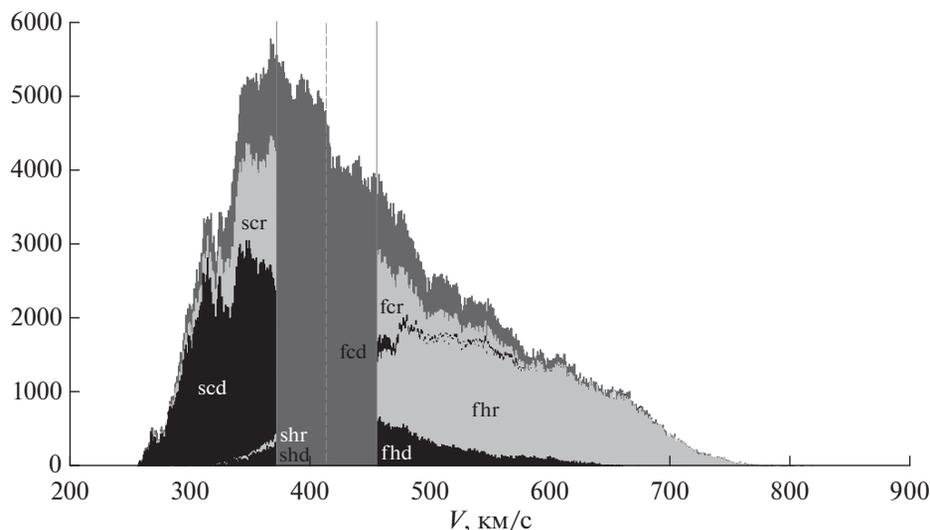


Рис. 2. Кумулятивная диаграмма вкладов типов солнечного ветра в распределение скорости в 2015–2017 гг. По вертикальной оси отложено число отсчетов. Размер бина взят равным 1 км/с. Вертикальной штриховой линией показана средняя скорость за 2009–2017 гг., сплошными серыми линиями обозначены пороговые значения. Снизу вверх: горячий-плотный, горячий-разреженный, холодный-плотный, холодный-разреженный ветры, а также (темно-серый цвет) ветер “неопределенного” типа.

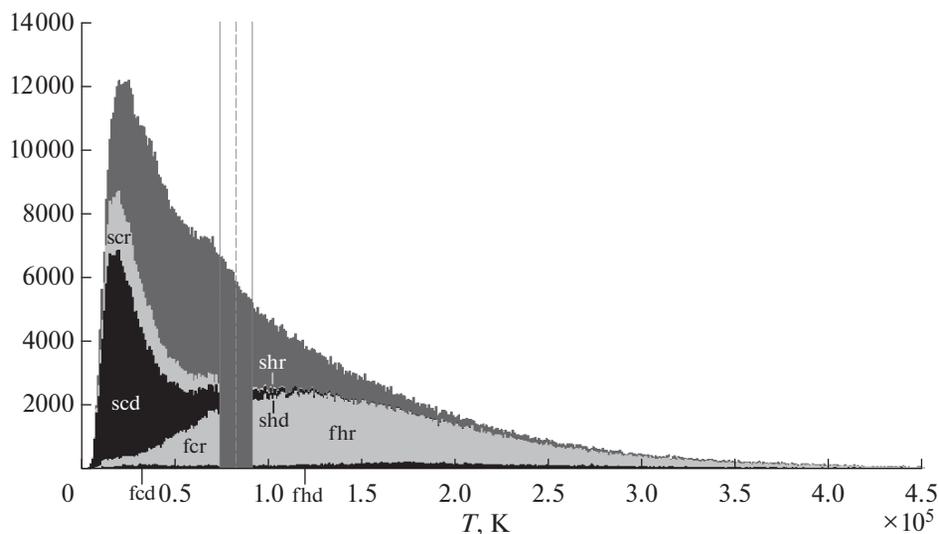


Рис. 3. Кумулятивная диаграмма вкладов типов солнечного ветра в распределение температуры в 2015–2017 гг. По вертикальной оси отложено число отсчетов. Размер бина взят равным 10^3 К. Вертикальной штриховой линией показана средняя температура за 2009–2017 гг., сплошными серыми линиями обозначены пороговые значения. Снизу вверх: быстрый-плотный, быстрый-разреженный, медленный-плотный, медленный-разреженный ветры, а также (темно-серый цвет) ветер “неопределенного” типа.

Таблица 6. Средние значения главных гидродинамических параметров и их среднеквадратичные отклонения для типов солнечного ветра в 2015–2017 гг.

№	Тип	Частота встречаемости, %	Скорость, км/с	Температура, тыс. К	Плотность, см ⁻³
1	fhd	3.93	518 ± 54	266 ± 151	10.1 ± 4.8
2	fhr	24.8	573 ± 71	184 ± 103	3.2 ± 1.0
3	fcd	0.66	500 ± 46	44 ± 18	11.7 ± 6.5
4	fcr	4.28	499 ± 43	55 ± 16	3.2 ± 1.0
5	shd	0.68	352 ± 18	118 ± 30	13.2 ± 6.8
6	shr	0.14	357 ± 15	154 ± 140	3.9 ± 1.1
7	scd	16.8	331 ± 26	31 ± 16	12.6 ± 6.8
8	scr	5.56	347 ± 20	34 ± 16	4.2 ± 0.9
0	неопр.	43.1	417 ± 54	80 ± 61	6.7 ± 4.9

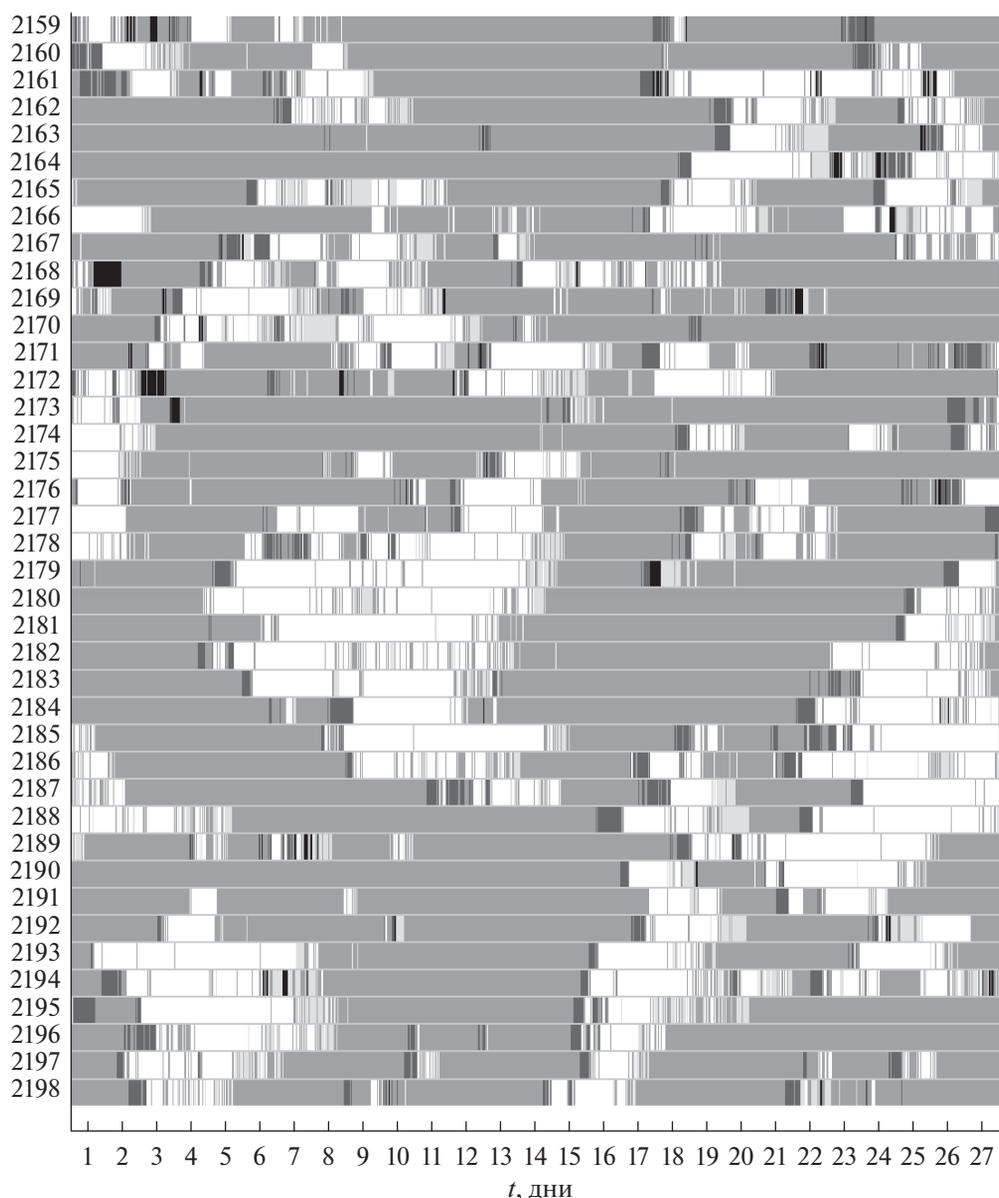


Рис. 4. Типы быстрого солнечного ветра на протяжении кэррингтоновских оборотов 2159–2198. Тип fhd обозначен темно-серым цветом, fhr – белым, fcd – черным, fcr – светло-серым.

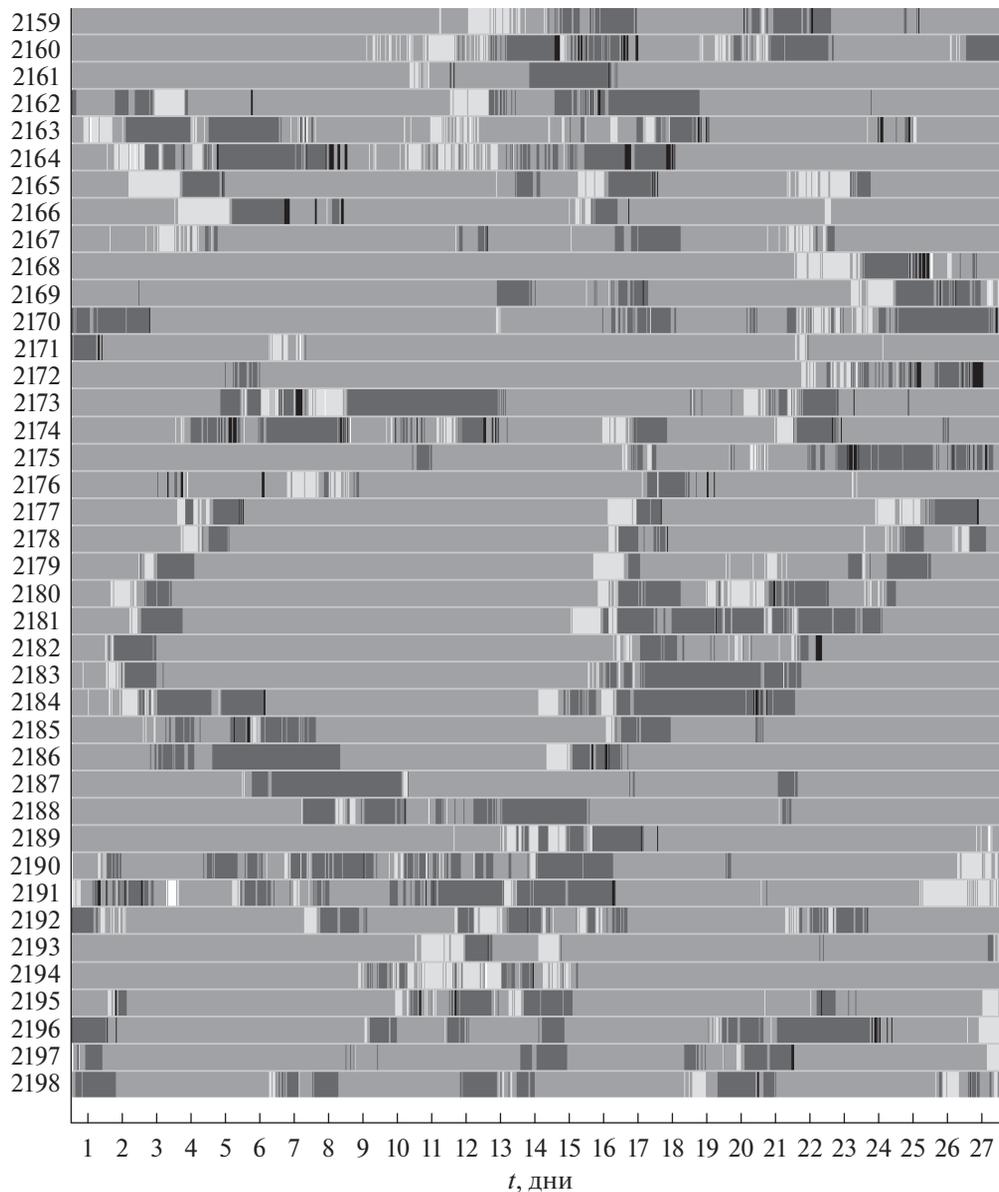


Рис. 5. Типы медленного солнечного ветра на протяжении кэррингтоновских оборотов 2159–2198. Тип shd обозначен черным цветом, shg – белым, scd – темно-серым, scg – светло-серым.

Распределение скорости и температуры солнечного ветра за 2015–2017 гг. с обозначением вкладов разных типов показано на рис. 2 и 3. Заметим, что вклады типов fcd и shg крайне малы. Диаграммы чередования типов солнечного ветра для кэррингтоновских оборотов, начиная с 2159-го (начало 04.01.2015) по 2198-й (окончание 30.12.2017), приведены на рис. 4 и 5. Для наглядности темными тонами на этих и других изображениях обозначается плотный ветер, светлыми – разреженный. Крупные светлые пятна на рис. 4 соответствуют потокам из корональных дыр. Заметим, что для последних характерным является чередование типов: fhd–fhr–fcr, а затем переход через участок “неопределенного” типа к типам scg и scd. В табл. 6 представлены средние характеристики и их сред-

неквадратичные отклонения для ветров разных типов. Так, средние температуры выше у “быстрых” ветров, чем у “медленных”, что соответствует положительной корреляции между V и T (коэффициент корреляции Спирмена $r = 0.65$ для периода 2009–2017 гг.). Скорость и плотность коррелируют отрицательно, хотя и слабее ($r = -0.34$ соответственно), и средние плотности у “быстрых” ветров ниже. Корреляция между T и n почти отсутствовала ($r = -0.13$).

Примеры типизации для отдельных событий и их совокупностей приводятся на рис. 6–8.

ОБСУЖДЕНИЕ

Бинарная классификация из восьми типов не является абсолютной и единственно возможной,

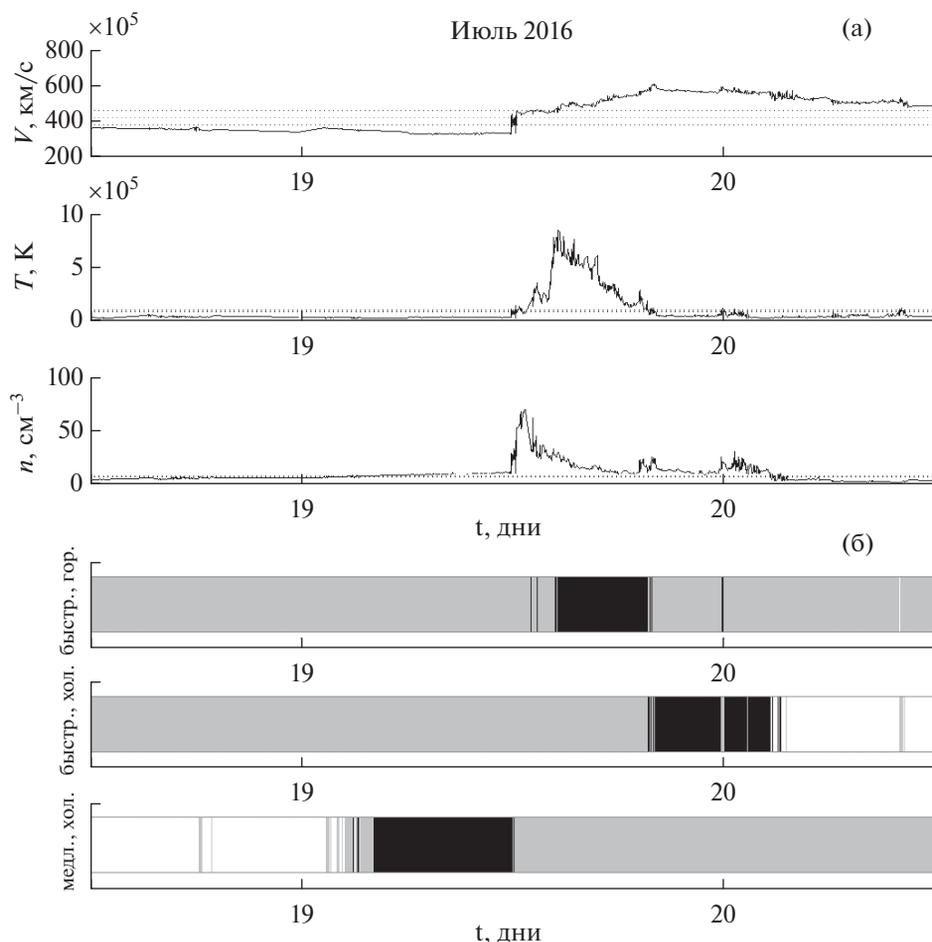


Рис. 6. Ветер редкого типа fcd после прихода выброса корональной массы поздним вечером 19.07.2016. (а) – Скорость, плотность и температура протонов. Горизонтальными штриховыми линиями обозначены средние и пороговые значения параметров. (б) – Чередование типов солнечного ветра. Периоды плотного ветра обозначены черным цветом, разреженного – белым. Суммарная продолжительность ветра типа fcd составила 6.7 ч. Медленный и горячий ветер отсутствовал, так что соответствующая полоса на графике не показана.

но она достаточно проста, удобна, полна, объективна и компактна для практического использования. Классификация носит гидродинамический характер, хорошо и наглядно отражает отклонения от некоторого среднего и типичного состояния гелиосферной плазмы в обе стороны по каждому из основных параметров, являющихся тремя нижними моментами функции распределения частиц. Последовательности чередования типов солнечного ветра могут быть наглядно изображены графически (рис. 4 и 5, а также пункты (б) на рис. 6–8). Такому представлению можно придать более компактную форму, если дополнительно использовать цветовую идентификацию, обозначая, например, холодные типы ветра холодными цветами, теплые – теплыми, плотные – темными, разреженные – светлыми, быстрые – контрастными и/или чистыми, медленные – приглушенными и/или смешанными.

С применением описанного нами подхода можно также рассматривать и классифицировать “тонкую структуру” солнечного ветра: короткомасштабные изменения параметров, тонкие волокна, нити, пики, которые пропадают при усреднении. Следует помнить, что результаты классификации зависят от выбора средних значений, которые будут разными для различных промежутков времени. В зависимости от постановки задачи следует в качестве опорных значений брать гидродинамические величины, усредненные либо за длительные интервалы времени (например, годы или месяцы), как это было сделано в настоящей статье, либо за тот, который непосредственно рассматривается.

Более интересная физическая задача состоит в обобщении на МГД случай с учетом магнитного поля. Замагниченные и немагниченные типы течения при этом удваивают количество возможных гидродинамических вариантов. Кинетиче-

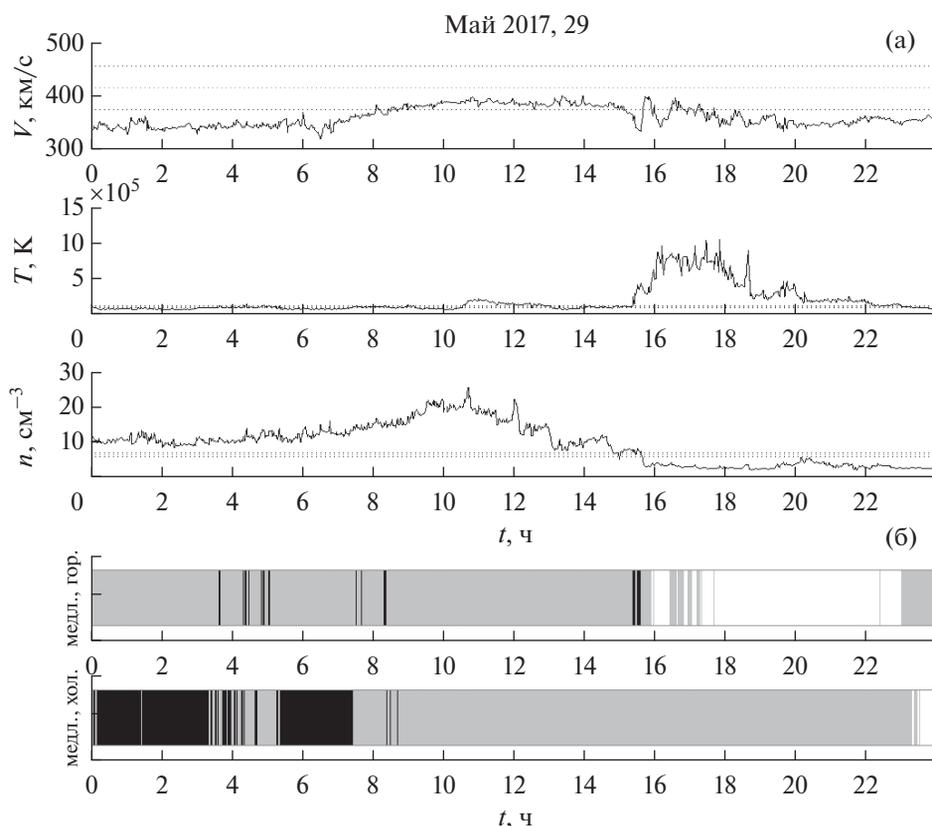


Рис. 7. Ветер редкого типа shr 29.05.2017. (а) – Скорость, плотность и температура протонов. Горизонтальными штриховыми линиями обозначены средние и пороговые значения параметров. (б) – Чередование типов солнечного ветра. Периоды плотного ветра обозначены черным цветом, разреженного – белым. Показаны графики для медленного ветра. Продолжительность ветра типа shr составила за сутки 6.4 ч. Также наблюдались типы shd (38 мин), scd (5.9 ч) и scr (33 мин). Быстрый ветер отсутствовал.

ские процессы также привносят свое богатое разнообразие. Имеет смысл также говорить о квазистационарных и переменных потоках, сравнивая между собой время их существования с пролетным временем (число Штрухала $S < 1$, $S > 1$). Ламинарные и турбулентные режимы удобно объективно различать по числу возбужденных и затрагиваемых степеней свободы, которое мало в первом случае и велико во втором. Различие же по числу Рейнольдса при этом носит условный и также не абсолютный характер, что видно из самого его определения, в которое входят линейный масштаб и скорость (неинвариантная величина относительно выбора движущейся системы координат). Построение более полных классификационных схем представляет несомненный интерес для теории и практики. Единственно, что стоит отметить в связи с этим, так это перманентность истечения вещества из Солнца, которая означает ограниченный смысл поиска “источников” среднего солнечного ветра. Возникает он как нелокальное эволюционное явление, а наибольший практический интерес представляют именно самые большие и самые маленькие

значения его параметров. Наиболее остро при этом стоит непростой вопрос не о том, откуда они в конечном счете берутся, но как их предвидеть. Средний солнечный ветер воспринимается при этом как некоторая эволюционная данность. Часто указание “типов” связано с попытками локализовать их источники на Солнце, например, в корональных дырах, активных областях со вспышками, в корональных выбросах массы, в эруптивных протуберанцах, мелких и крупных магнитных структурах на “спокойном” Солнце, в стримерах, псевдостримерах и т.п. Однако следует отметить практическую невозможность подобной индивидуальной “привязки” в целом ряде случаев, особенно если речь идет о слишком мелких пространственно-временных масштабах, требующих кинетического описания. Изменения параметров среднего солнечного ветра наиболее интересны на самой большой временной шкале, которая здесь не рассматривается. Источником среднего солнечного ветра в конечном счете является все Солнце. Нет никакого практического интереса, да это и невозможно, в прослеживании крайне сложных траекторий отдельных частиц или их

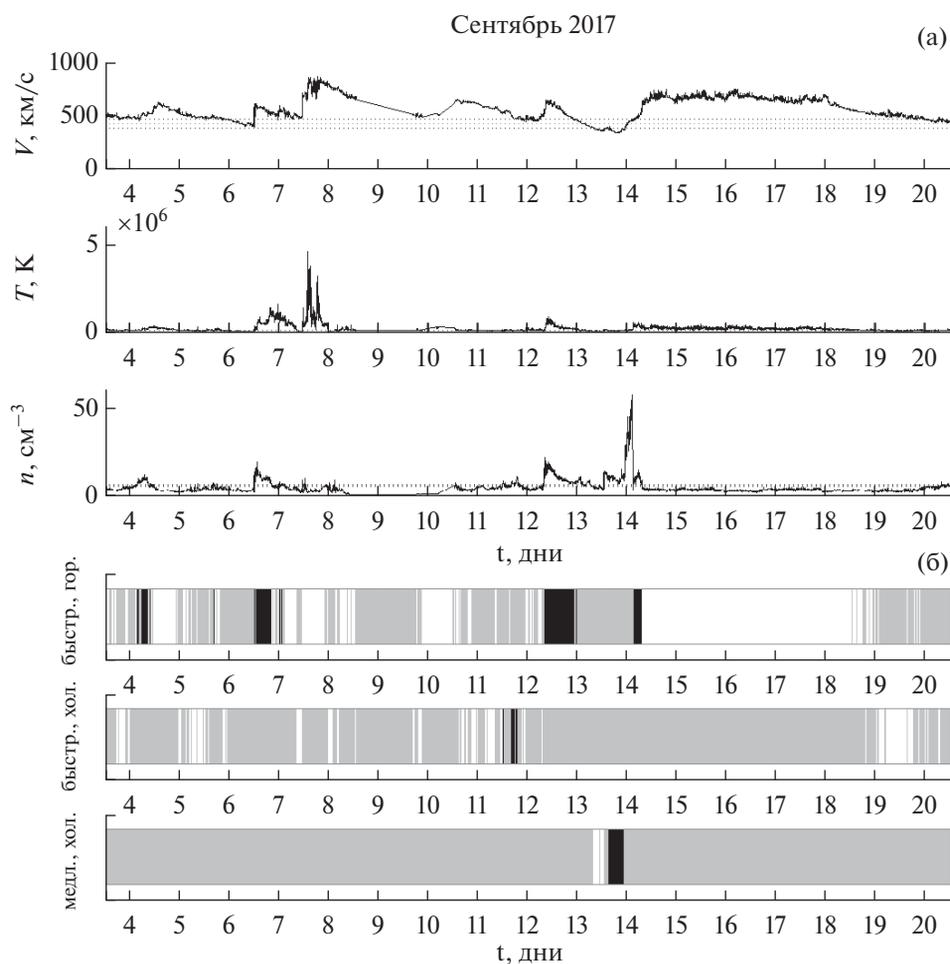


Рис. 8. Сильновозмущенный период 4–20 сентября 2017 г. (а) – Скорость, плотность и температура протонов. Горизонтальными штриховыми линиями обозначены средние и пороговые значения параметров. (б) – Чередование типов солнечного ветра. Периоды плотного ветра обозначены черным цветом, разреженного – белым. Показаны графики для преобладавшего быстрого ветра, а также для типов *scd* и *scg*. Наблюдаются выбросы корональной массы и, начиная с 14 сентября, ветер из корональной дыры. Суммарная продолжительность ветра типов *fhg* и *fhd* за 17 сут составила 183.8 ч и 32.3 ч соответственно.

групп на всем пути следования “от самого начала”. Вещество короны выносится солнечным ветром в гелиосферу за время порядка недели, а хромосферы – за годы. Величина полного потока вещества $4\pi R^2 VR^2$ определяется эволюционными условиями для данной звезды как единого целого.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Потоки плазмы от Солнца формируются на всем пути их следования вплоть до точки наблюдения. Процессы формирования в общем случае носят нелинейный, нестационарный, нелокальный и диссипативный, МГД и кинетический характер. В солнечном ветре существуют потоки восьми различных гидродинамических типов, состоящих из относительно быстрых (f) и медленных (s), горячих (h) и холодных (c), плотных (d) и разреженных (g) участков плазмы, перемежаю-

щихся во времени и в пространстве в зависимости от граничных и начальных условий на Солнце.

Солнечный ветер есть прямое следствие солнечной активности и процессов, происходящих в гелиосфере. Исследуя солнечный ветер, мы сможем лучше понять физику процессов, происходящих на Солнце. Изменения параметров солнечного ветра влияют на космическую погоду и состояние магнитного поля Земли, поэтому так важно уметь предсказывать поведение солнечного ветра на его пути до Земли.

Работа выполнена при частичной поддержке Программой П-7 РАН на 2016 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андреева О.А., Малащук В.М., Ахтемов З.С., Жигалкин Р.К.
Изменение площади и интенсивности гигантской

- корональной дыры // Изв. Крымской астрофиз. обс. 2018. Т. 114. № 1. С. 129–134.
- Бархатов Н.А., Ревунова Е.А., Виноградов А.Б.* Проявление ориентации магнитных облаков солнечного ветра в сезонной вариации геомагнитной активности // Космич. исслед. 2014. Т. 52. № 4. С. 286–295.
- Веселовский И.С., Дмитриев А.В., Суворова А.В.* Алгебра и статистика солнечного ветра // Космич. исслед. 2010. Т. 48. № 2. С. 115–130.
- Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю.* Солнечные и межпланетные источники геомагнитных бурь: аспекты космической погоды // Геофизич. процессы и биосфера. 2009. Т. 8. № 1. С. 5–35.
- Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю.* Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // Космич. исслед. 2009. Т. 47. № 2. С. 99–113.
- 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.
- Еселевич В.Г., Еселевич М.В.* Отличия в развитии начальной фазы формирования двух типов корональных выбросов массы // Космич. исслед. 2015. Т. 53. № 1. С. 24–34.
- Лотова Н.А., Обридко В.Н.* Зависимость скорости солнечного ветра от магнитного поля короны в ходе 23 цикла // Письма в Астрон. журн. 2013. Т. 39. № 7. С. 538–544.
- Паркер Е.Н.* Динамические процессы в межпланетной среде. М.: Мир, 1965.
- Хундхаузен А.* Расширение короны и солнечной ветер. М.: Мир, 1976.
- Шугай Ю.С., Веселовский И.С., Слемзин В.А., Ермолаев Ю.И., Родькин Д.Г.* О возможных причинах несоответствия между прогнозируемыми и наблюдаемыми параметрами высокоскоростных потоков солнечного ветра // Космич. исслед. 2017. Т. 55. № 1. С. 22–31.
- Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Chao J.-K., Wang C.B., Rastaetter L., Panasyuk M.I., Lazutin L.L., Kovtyukh A.S., Veselovsky I.S., Myagkova I.N.* Anomalous dynamics of the extremely compressed magnetosphere during 21 January 2005 magnetic storm // J. Geophys. Res. 2014. V. 119. № 2. P. 877–896.
- Gosling J.T.* Corotating and transient solar wind flows in three dimensions // Annu. Rev. Astron. and Astrophys. 1996. V. 34. P. 35–73.
- Gosling J.T.* Coronal mass ejections: An overview // Coronal mass ejections. Geophys. Monograph 99. / Eds Crooker N., Joselyn J.A., Feynman J. 1997. P. 9–16.
- Habbal S.R., Woo R., Fineschi S., O'Neal R., Kohl J., Nogi G., Korendyke C.* Origins of the slow and the ubiquitous fast solar wind // Astrophys. J. Lett. 1997. V. 489. L103–L106.
- Marsch E.* Solar wind models from the Sun to 1 AU: Constraints by in situ and remote sensing measurements // Coronal holes and solar wind acceleration. Proc. SOHO-7 Workshop, held at Asticou Inn in Northeast Harbor, Maine, U.S.A., from 28 September–1 October, 1998 / Eds Kohl J.L., Cranmer S.R. 1999. P. 1–24.
- Mullan D.J.* Sources of the solar wind: What are the smallest-scale structures? // Astron. and Astrophys. 1990. V. 232. № 2. P. 520–535.
- Mursula K., Hiltula T., Zieger B.* Streamer belt north-south asymmetry and its long-term evolution // Solar variability: from core to outer frontiers. The 10th European Solar Phys. Meeting, 9–14 September 2002, Prague, Czech Republic / Ed. Wilson A. ESA SP-506, V. 1. Noordwijk: ESA Publications Division, ISBN 92-9092-816-6. 2002. P. 29–32.
- Nolte J.T., Krieger A.S., Timothy A.F., Gold R.E., Roelof E.C., Vaiana G., Lazarus A.J., Sullivan J.D., McIntosh P.S.* Coronal holes as sources of solar wind // Sol. Phys. 1976. V. 46. № 2. P. 303–322.
- Richardson I.G., Cliver E.W., Cane H.V.* Sources of geomagnetic activity over the solar cycle: Relative importance of CMEs, high-speed streams, and slow solar wind // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. № A8. P. 18203–18213.
- Richardson I.G., Cliver E.W., Cane H.V.* Sources of geomagnetic storms for solar minimum and maximum conditions during 1972–2000 // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28. № 13. P. 2569–2572.
- Richardson I.G., Cane H.V., Cliver E.W.* Sources of geomagnetic activity during nearly three solar cycles (1972–2000) // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. A8.
- 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.
- Sanchez-Diaz E., Rouillard A.P., Lavraud B., Segura K., Tao C., Pinto R., Sheeley N.R., Jr., Plotnikov I.* The very slow solar wind: Properties, origin and variability // J. Geophys. Res. 2016. V. 121. № 4. P. 2830–2841.
- Snyder C.W., Neugebauer M., Rao U.R.* The solar wind velocity and its correlation with cosmic-ray variations and with solar and geomagnetic activity // J. Geophys. Res. 1963. V. 68. № 24. P. 6321–6370.
- Usmanov A.V., Goldstein M.L., Ogilvie K.W., Farrell W.M., Lawrence G.R.* Low-density anomalies and sub-Alfvénic solar wind // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. A01106.
- Wang Y.-M., Howley S.H., Sheeley N.R.* The magnetic nature of coronal hole // Science. 1996. V. 271. P. 464–469.
- Yao S., Marsch E., Tu C.-Y., Schwenn R.* Identification of prominence ejecta by the proton distribution function and magnetic fine structure in interplanetary coronal mass ejections in the inner heliosphere // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. A05103.
- Yermolaev Yu.I., Yermolaev M.Yu., Zastenker G.N., Zelenyi L.M., Petrukovich A.A., Sauvaud J.-A.* Statistical studies of geomagnetic storm dependencies on solar and interplanetary events: a review // Planet. and Space Sci. 2005. V. 53. P. 189–196.