

УДК 523.62-726

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПЛАЗМЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА СВОЙСТВА ТУРБУЛЕНТНОГО КАСКАДА В МАГНИТОСЛОЕ

© 2019 г. Л. С. Рахманова^{1, *}, М. О. Рязанцева¹, Г. Н. Застенкер¹, Ю. И. Ермолаев¹,
И. Г. Лодкина¹, Л. С. Чесалин¹

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

*rakhlud@gmail.com

Поступила в редакцию 04.04.2019 г.

После доработки 04.04.2019 г.

Принята к публикации 25.04.2019 г.

Космическая плазма является естественной лабораторией для изучения турбулентности в широком диапазоне масштабов. Быстрые измерения потока ионов прибором БМСВ на спутнике Спектр-Р дают возможность исследовать характеристики турбулентности плазмы солнечного ветра и магнитослоя на ионных и субионных масштабах. В данной работе анализируется, каким образом характеристики турбулентного каскада на указанных масштабах в магнитослое зависят от характеристик турбулентности плазмы солнечного ветра перед околоземной ударной волной. Анализируются несколько пересечений спутником Спектр-Р околоземной ударной волны. Проводится сравнение форм спектров флуктуаций потока ионов и показателей степенных функций, которыми описываются спектры на кинетических и магнитогиродинамических масштабах перед и за околоземной ударной волной. Показано, что непосредственно за околоземной ударной волной на магнитогиродинамических масштабах происходит отклонение спектров от вида, предсказываемого теориями развитой турбулентности и наблюдающегося в солнечном ветре. Такая особенность спектров свидетельствует о перераспределении энергии в турбулентном каскаде непосредственно за околоземной ударной волной. На кинетических масштабах за фронтом околоземной ударной волны, как правило, наблюдаются более крутые спектры, чем в солнечном ветре, однако их наклон определяется свойствами турбулентного каскада в набегающем потоке. Показано, что наиболее сильное различие между характеристиками турбулентности перед и за околоземной ударной волной наблюдается в периоды течения солнечного ветра, ассоциированные с областями сжатия перед межпланетными проявлениями корональных выбросов массы.

DOI: 10.1134/S0023420619060074

ВВЕДЕНИЕ

Турбулентность характерна как для плазмы солнечного ветра (СВ), так и для плазмы магнитослоя (МСЛ). При этом, указанные области околоземного пространства можно использовать в качестве природных лабораторий для исследования свойств турбулентности в бесстолкновительной плазме.

Турбулентный каскад в солнечном ветре изучался в течение длительного времени в широком диапазоне масштабов, начиная с масштабов, на которых происходит инжекция энергии в систему (более 10^6 км), и вплоть до масштабов порядка гирорадиуса протона (~ 1000 км), так называемых диссипативных масштабов, на которых важную роль начинают играть кинетические эффекты и происходит диссипация энергии и нагрев плазмы (см. обзоры [1, 2]). При этом, промежуточные

масштабы, так называемая инерционная область каскада или магнитогиродинамические (МГД) масштабы, как правило, характеризуются степенным спектром с показателем $-5/3$, и такой вид спектра считается универсальным для развитой турбулентности (т.н. Колмогоровский спектр) и наблюдается во множестве астрофизических объектов [1, 3]. В последние десятилетия основной интерес сосредоточен на масштабах порядка и менее гирорадиуса протона, и одной из важных задач является определение типа флуктуаций, формирующих турбулентный каскад на этих масштабах, а также механизмов, обуславливающих диссипацию энергии в плазме [2, 3].

В отличие от турбулентности солнечного ветра, которая в квазистационарном потоке развивается свободно, в магнитослое турбулентный каскад всегда формируется между двумя границами — магнитопаузой и околоземной ударной волной (ОЗУВ).

Исследование турбулентности в магнитослое на масштабах, соответствующих переходу от инерционной к диссипативной области каскада, активно ведется в последнее время благодаря запуску космических миссий, таких как *ИНТЕРБОЛ 1*, *Cluster* и *MMS* (напр., [4–14]). Однако, подавляющая часть исследований была выполнена на основе измерений флуктуаций магнитного поля в связи с тем, что прямые измерения параметров плазмы с достаточно высоким временным разрешением проводились только для единичных случаев (напр., [15–17]). При этом, в значительном количестве исследований предполагается, что турбулентный каскад формируется из флуктуаций альфвеновского типа, и для его исследования достаточно иметь представления о флуктуациях магнитного поля (напр., [18]). Однако, как было показано в работе [10], в магнитослое могут доминировать флуктуации сжатия, что не характерно для альфвеновской турбулентности. Вследствие чего, для понимания процессов, приводящих к формированию турбулентного каскада, важно рассматривать не только флуктуации магнитного поля, но и отдельно флуктуации плазменных параметров. После запуска космического аппарата *Спектр-Р* в 2011 г. стали проводиться непрерывные измерения потока ионов прибором БМСВ [19, 20], что позволило на основе обширной статистики определить характеристики турбулентности в магнитослое по измерениям плазменных параметров [21–24].

Результаты статистических исследований как для параметров плазмы [23, 24], так и для параметров магнитного поля [10, 25] показывают, что наблюдается заметное отклонение характеристик турбулентности в магнитослое вблизи околоземной ударной волны от соответствующих характеристик в солнечном ветре и от предсказаний пространственных теорий турбулентности. Указанные исследования опирались на статистический анализ и не учитывали возможное влияние локальных факторов, таких как характеристики набегающего потока СВ, на вид турбулентного каскада за ОЗУВ. В связи с этим представляется необходимым исследование влияния условий в плазме СВ непосредственно перед ОЗУВ на характеристики турбулентности за фронтом ОЗУВ на основе отдельных пересечений спутником. В данной работе рассматривается, как изменяются характеристики спектров флуктуаций потока ионов при пересечении ОЗУВ на основе анализа нескольких отдельных пролетов. Такой анализ позволяет понять, является ли изменение спектров за ОЗУВ характерной чертой турбулентности плазмы магнитослая, а не влиянием локальных условий в набегающем потоке, а также рассмотреть, существует ли связь между характеристиками турбулентности перед и за ОЗУВ. Помимо этого, на статистическом материале, включаю-

щем 250 ч измерений потока ионов в магнитослое, анализируется влияние различных типов солнечного ветра на характеристики турбулентного каскада за ОЗУВ.

ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОГО КАСКАДА ПРИ ПЕРЕСЕЧЕНИИ ПЛАЗМОЙ ОКОЛОЗЕМНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

В данной работе используются данные прибора БМСВ (Быстрого Монитора Солнечного Ветра) на спутнике *Спектр-Р*. Прибор непрерывно измеряет поток ионов и направление его прихода с временным разрешением 31 мс, а также ключевые параметры плазмы – плотность, скорость, температуру – с временным разрешением 3 с или 31 мс, в зависимости от режима работы. Подробная информация о функционировании прибора приведена в работах [19, 20]. В настоящей работе используются измерения потока ионов с разрешением 31 мс и измерения плотности и скорости с разрешением 3 с.

На рис. 1а показана энергетическая спектрограмма ионов в период 01:30–06:00 UT 25.II.2015. На рис. 1б–1г черной линией показаны, соответственно, измерения потока ионов, плотности плазмы и направленной скорости ионов для того же периода времени. Для сравнения серой линией на каждой панели представлены измерения соответствующего параметра в солнечном ветре на спутнике *WIND*; измерения со спутника *WIND* сдвинуты на время распространения плазмы между космическими аппаратами. Хорошо видно, что в рассматриваемый период времени не наблюдается каких-либо крупномасштабных структур, поток солнечного ветра является квазистационарным. Плотность плазмы СВ составляет $\sim 15 \text{ см}^{-3}$; модуль направленной скорости плазмы составляет 350 км/с, что характерно для плазмы медленного СВ. Исходя из спектрограммы и значений параметров можно видеть, что *Спектр-Р* находился в солнечном ветре, в 03:30 UT пересек околоземную ударную волну и вошел в магнитослой; момент пересечения обозначен вертикальной белой линией на панели а и вертикальной пунктирной линией на панелях б–г. В данном случае ОЗУВ является квазиперпендикулярной, угол θ_{BN} между нормалью к ОЗУВ и направлением межпланетного магнитного поля составляет 70° ; угол был рассчитан в точке входа плазмы в МСЛ с использованием данных спутника *WIND* и трассирования спутника *Спектр-Р* вдоль линии тока, полученной по модели Спрайтера [26]. Координаты спутника в начале и в конце пересечения указаны на рисунке. Хорошо видно, что средние значения всех параметров, измеренные на двух спутниках, совпадают до тех пор, пока *Спектр-Р* не пересек ОЗУВ. При пересечении ОЗУВ значение потока и

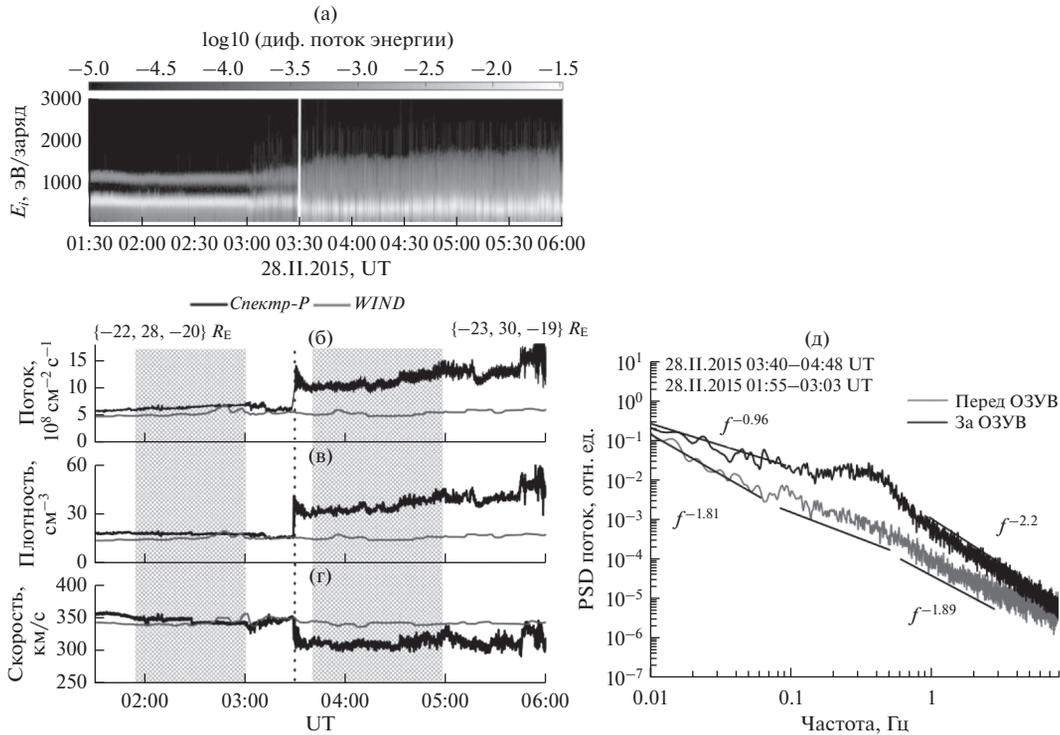


Рис. 1. (а) энергетическая спектрограмма ионов со спутника *Спектр-Р*; (б–г) временной ход потока ионов, плотности и скорости плазмы, измеренный на спутнике *Спектр-Р* (черная линия) и *WIND* (серая линия); (д) Фурье-спектры флуктуаций потока ионов перед (серая линия) и за (черная линия) ОЗУВ в ходе пересечения.

плотности ионов увеличивается в 1.5–2 раза, а модуль направленной скорости уменьшается на 50 км/с.

Для определения характеристик турбулентного каскада в настоящей работе анализируются Фурье-спектры флуктуаций величины потока ионов плазмы перед и за фронтом ОЗУВ. При этом предполагается, что флуктуации потока ионов обусловлены флуктуациями плотности, а Фурье-спектры для этих двух величин подобны (см. [27, 28]). Для вычисления частотных спектров используется быстрое преобразование Фурье с последующим сглаживанием при помощи окна Хэмминга в пространстве частот. Заштрихованными областями на рис. 1б–1г выделены интервалы, для которых на рис. 1д построены Фурье-спектры перед (серой линией) и за (черной линией) ОЗУВ. Интервалы выбирались таким образом, чтобы исключить влияния волновых процессов, которые могут генерироваться на фронте квазиперпендикулярных ударных волн (см. напр. [29, 30]). Кроме того, перед пересечением ОЗУВ с 03:00 до 03:30 наблюдается возмущение в плазме СВ, поэтому указанный интервал также был исключен из рассмотрения при Фурье-анализе.

Как следует из примера, приведенного на рис. 1, перед ОЗУВ, т.е. в СВ, спектр флуктуаций потока ионов на МГД масштабах (в данном примере, в диапазоне частот 0.01–0.08 Гц) может быть ап-

проксимирован степенной функцией с показателем -1.81 ± 0.04 , что несколько больше по модулю, чем показатель $-5/3$, характерный для плазмы солнечного ветра и для теорий развитой турбулентности, однако наблюдается в СВ согласно статистическим исследованиям. В диапазоне частот 0.08–0.5 Гц наблюдается выполаживание спектра, и при дальнейшем увеличении частот происходит излом спектра и переход к кинетическим масштабам. Спектры подобного типа (с плато перед изломом) наблюдаются в СВ достаточно часто [31, 32]. На кинетических масштабах спектр флуктуаций потока ионов в СВ в данном случае описывается степенной функцией с показателем -1.89 ± 0.02 .

В магнитослое непосредственно за ОЗУВ спектр флуктуаций потока ионов на МГД масштабах описывается степенной функцией с показателем -0.96 ± 0.06 , что существенно меньше по модулю, чем в плазме СВ и чем предсказывается теориями развитой турбулентности. Между МГД и кинетическими масштабами наблюдается широкий пик, характерный для областей магнитослоя вблизи ОЗУВ [23] и связанный с волновой активностью, возникающей в МСЛ из-за развития плазменных неустойчивостей вследствие увеличенной анизотропии температур [33]. На кинетических масштабах спектр в МСЛ имеет наклон -2.2 ± 0.01 , т.е. несколько больший по модулю,

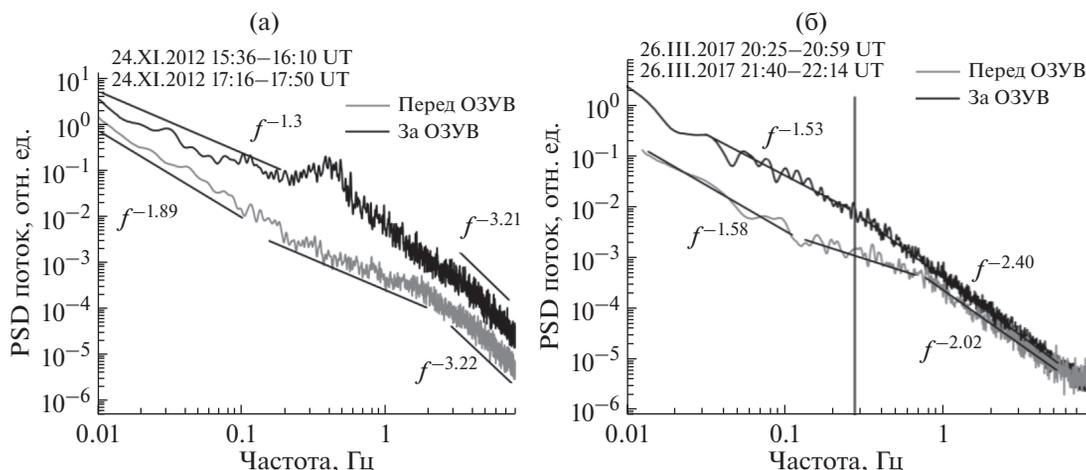


Рис. 2. Спектры флуктуаций потока ионов перед (серая линия) и за (черная линия) ОЗУВ в ходе двух пересечений ОЗУВ.

чем перед ОЗУВ. Таким образом, в рассмотренном событии наблюдается выполаживание спектра на МГД масштабах и незначительное укрупнение спектра на кинетических масштабах при пересечении плазмой ОЗУВ.

В настоящей работе было рассмотрено еще два пересечения, подобных представленному на рис. 1. Отбирались пересечения, для которых доступны достаточные по длительности – не менее 40 мин – интервалы измерений прибора БМСВ перед и за ОЗУВ. Кроме того, отбирались интервалы, в ходе которых отклонение вектора потока ионов от направления на Солнце не превышало 25° , поскольку при больших отклонениях существенно возрастают ошибки измерения параметров плазмы [34]. Отобранные события относятся к квазиперпендикулярной ОЗУВ. Одно из пересечений – 24.XI.2012 17:10 UT – сопровождалось умеренными вариациями плотности плазмы в СВ в пределах $25\text{--}40\text{ см}^{-3}$ при постоянной скорости $\sim 400\text{ км/с}$, второе – 26.III.2017 – наблюдалось на фоне спокойного невозмущенного течения СВ с плотностью плазмы 15 см^{-3} и скоростью 370 км/с . На рис. 2а и 2б представлены спектры флуктуаций потока ионов перед и за ОЗУВ для этих двух событий. Для указанных событий были выбраны интервалы длительностью 35 мин перед и за фронтом ОЗУВ, при этом соблюдался отступ от фронта минимум 3 мин, чтобы избежать рассмотрения эффектов, связанных с фронтом ударной волны [29]. В обоих случаях, так же как и в примере на рис. 1, наблюдается уплощение спектров на МГД масштабах при пересечении плазмой ОЗУВ, однако для события 26.III.2017 это уплощение незначительно. Также, для обоих событий характерно укрупнение кинетической части спектра в МСЛ.

Как было сказано во Введении, в ряде работ на основе статистики рассматривались характеристики турбулентности перед и за ОЗУВ. В табл. 1 приведены значения наклонов спектров на МГД

и кинетических масштабах перед и за ОЗУВ, полученные в данной работе (строки 1–3), и полученные в работах [23, 24] (строка 4) на статистике измерений прибора БМСВ в 2011–2017 гг. Помимо характеристик спектров в табл. 1 приведены параметры плазмы в набегающем потоке СВ.

Из сравнения наклонов спектров в табл. 1 можно сделать вывод, что уплощение спектров на МГД масштабах – это типичное изменение турбулентного каскада при пересечении ОЗУВ. При этом наблюдается укрупнение спектров на кинетических масштабах. Следует отметить, что наклоны спектров после излома за ОЗУВ, полученные в данной работе, в двух из трех событий существенно меньше по модулю, чем средние значения, полученные в статистическом анализе [24] (см. строку 4 табл. 1). Однако, в этих событиях наклоны спектров на кинетических масштабах перед ОЗУВ были также существенно меньшими по модулю, чем в среднем в СВ [21, 35]. Таким образом, за ОЗУВ наблюдается увеличение темпов диссипации энергии, при этом механизмы диссипации в этой области определяются, по-видимому, локальными процессами, зависящими от характеристик набегающего потока СВ.

Ранее, в работе [28] проводился анализ изменений характеристик спектров флуктуаций потока ионов при прохождении межпланетной ударной волны (МУВ). Авторы выявили, что на кинетических масштабах спектры укрупняются при прохождении МУВ, при этом наблюдается линейная связь между наклонами спектров перед и за фронтом МУВ. Также было показано, что на МГД масштабах наклон спектра за МУВ зависит от соответствующего наклона перед МУВ; при этом, согласно работе [36], за МУВ преимущественно наблюдаются спектры с наклоном $-5/3$. Таким образом, существуют различия в модификации турбулентного каскада на МГД масштабах при пересечении плазмой ОЗУВ и МУВ: при пе-

Таблица 1

Дата	S_1		S_2		Параметры СВ			Тип СВ
	СВ	МСЛ	СВ	МСЛ	N_i , см ⁻³	V_i , км/с	T_i , эВ	
28.II.2015	-1.81 ± 0.04	-0.96 ± 0.06	-1.89 ± 0.02	-2.2 ± 0.01	15	350	2.8	Sheath
26.III.2017	-1.58 ± 0.09	-1.53 ± 0.03	-2.02 ± 0.02	-2.4 ± 0.01	15	370	2.0	Slow
24.XI.2012	-1.89 ± 0.03	-1.30 ± 0.04	-3.22 ± 0.02	-3.21 ± 0.03	30	400	2.8	MC
Статистика 2011–2017 гг.	-1.6 ± 0.2	-1.3 ± 0.2	-2.9 ± 0.2	-3.2 ± 0.4		–		–

ресечения МУВ наклон спектра остается близким к $-5/3$, тогда как при пересечении ОЗУВ, как правило, наблюдается выполаживание спектра и отличие его от Колмогоровского вида. На кинетических масштабах характеристики турбулентного каскада изменяются подобным образом как при пересечении МУВ, так и при пересечении ОЗУВ. Можно сделать вывод, что перераспределение энергии в турбулентном каскаде, приводящее к отклонению его формы от предсказаний теорий развитой турбулентности, является характерным свойством плазмы именно за ОЗУВ.

ВЛИЯНИЕ ТИПА КРУПНОМАСШТАБНОГО ТЕЧЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В МАГНИТОСЛОЕ

Известно, что в зависимости от источника плазмы в солнечной короне и от особенностей распространения в межпланетном пространстве можно выделить несколько типов крупномасштабного течения солнечного ветра. В настоящей работе было рассмотрено, какое влияние может оказывать солнечный ветер различных типов (по классификации, приведенной в работах [37, 38]) на характеристики турбулентности за ОЗУВ.

Для анализа была использована статистика, основанная на 250 ч измерений прибора БМСВ в МСЛ в 2011–2017 гг. Ряды данных были разделены на интервалы длительностью ~ 17 мин, и для каждого интервала был построен спектр флуктуаций потока ионов, аналогичный приведенным на рис. 1 и 2. Ранее в работах [23, 24] для каждого спектра в рассматриваемой статистике был определен его тип: 1) с двумя наклонами (см. черную линию на рис. 2б), 2) с пиком (см. черную линию на рис. 2а), 3) с плато (см. серую линию на рис. 2а и 2б) и 4) спектры с нелинейным укрупнением на кинетических масштабах; кроме того, для каждого спектра были определены наклоны на МГД и кинетических масштабах. Статистический анализ характеристик турбулентности плазмы в МСЛ подробно описан в работах [23, 24], средние показатели наклонов приведены также в табл. 1.

Чтобы рассмотреть, какое влияние оказывает набегающий поток СВ на характеристики турбулентности непосредственно за ОЗУВ, в данном ис-

следовании по методике, описанной в работе [39], оценивалось значение относительного расстояния от точки измерения в МСЛ до магнитопаузы и ОЗУВ – D ($D = 0$ на магнитопаузе, $D = 1$ на ОЗУВ) – и выбирались только интервалы с $D > 0.75$ (аналогично отбору, проведенному в работе [24]). Для выбранных интервалов определялся тип течения СВ по каталогу Ермолаева и др. [37], доступно на интернет-ресурсе <ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/>. В общей сложности вблизи ОЗУВ в МСЛ было выбрано 357 интервалов, относящихся к следующим типам: Slow (медленный невозмущенный СВ, 210 интервалов), Sheath (область сжатия перед межпланетным проявлением коронального выброса массы, в частности, перед магнитными облаками, 85 интервалов) и CIR (область сжатия перед набегающим быстрым течением, 62 интервала). События, относящиеся к остальным типам, не рассматриваются в данном разделе в виду малой статистики их наблюдений (менее 10 интервалов каждого из остальных типов).

В первую очередь было рассмотрено, какая форма спектров флуктуаций за ОЗУВ характерна для различных типов крупномасштабного течения СВ. На рис. 3 приведена зависимость числа спектров (по отношению к общему их числу) с двумя наклонами (черные столбцы), с пиком (серые столбцы), с плато (белые столбцы) и с нелинейным укрупнением (заштрихованные белые столбцы) от типа СВ. Числами над столбцами указано общее количество рассмотренных спектров, относящихся к каждому типу СВ; сверху на рис. 3 приведено количество спектров каждого типа. Видно, что для СВ типа Slow и Sheath вероятность наблюдения спектров с пиком существенно меньше, чем вероятность наблюдения спектров с двумя наклонами, так же, как было показано в среднем для всей статистики в работе [24]. Однако, в периоды наблюдения солнечного ветра типа CIR за ОЗУВ в $\sim 50\%$ случаев наблюдаются спектры с пиками, т.е. частота их встречаемости сравнивается со спектрами с двумя наклонами. Следует отметить, что рассматриваемые спектры наблюдались в различные дни в течение 2011–2017 гг., и данный эффект был виден для всех интервалов в CIR областях. Таким образом, взаимодействие областей сжатия перед набегающим быстрым тече-

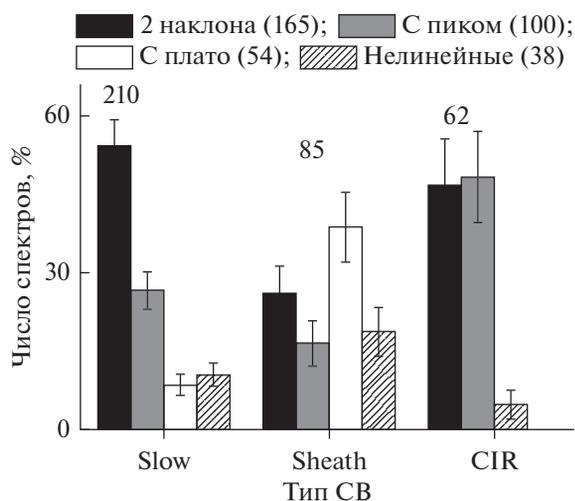


Рис. 3. Зависимость формы спектра флуктуаций потока ионов, наблюдаемых за ОЗУВ, от типа набегающего потока СВ.

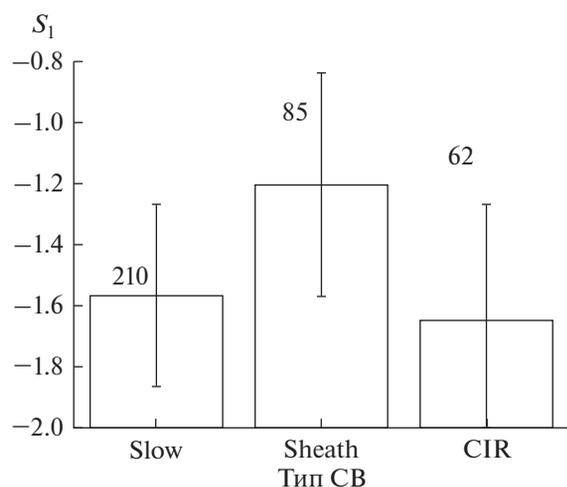


Рис. 4. Зависимость показателя наклона спектра флуктуаций потока ионов на МГД масштабах за околоземной ударной волной от типа набегающего потока солнечного ветра.

нием с ОЗУВ сопровождается усилением волновой активности в МСЛ непосредственно за ОЗУВ.

Из рис. 3 также следует, что в периоды СВ типа Sheath за ОЗУВ чаще всего наблюдаются спектры с плато. Полученный результат свидетельствует о возрастании роли кинетических альфвеновских волн [40] в периоды взаимодействия области сжатия, предшествующей проявлениям корональных выбросов масс в СВ, с ОЗУВ.

Для спектров с нелинейным укручением не удалось выделить зависимость от типа течения СВ. Отсутствие зависимости может быть связано с тем, что спектры такого типа, как это было показано в СВ [41], чаще всего наблюдаются в магнитных облаках, которые в настоящей работе не рассмотрены из-за малой статистики их наблюдения.

Как было показано в предыдущем разделе, за ОЗУВ наблюдается выполаживание спектров флуктуаций потока ионов на МГД масштабах. На рис. 4 представлены средние значения наклона спектров на МГД масштабах для рассматриваемых типов СВ. Несмотря на большие стандартные отклонения, свидетельствующие о широких распределениях значений наклонов, хорошо видно, что для спокойного медленного течения СВ за ОЗУВ наблюдаются спектры с наклоном, близким к $-5/3$, что характерно для развитой турбулентности и соответствует теоретическим предсказаниям. Спектры, существенно отличающиеся от колмогоровского вида, чаще наблюдаются в периоды солнечного ветра, относящегося к областям сжатия перед корональным выбросом массы или магнитным облаком. Для СВ типа CIR невозможно сделать однозначные выводы в связи с сильным разбросом значений наклонов. В последнем столбце таблицы 1 указано, какой тип СВ наблюдался в ходе каждого пересечения, рассмотренного выше. Как видно, пересечение 28.II.2015, характеризующее наиболее сильным уплощением спектра на МГД масштабах при пересечении ОЗУВ, наблюдалось в период СВ типа Sheath, а событие 26.III.2017, для которого наблюдается незначительное изменение наклона спектра на МГД масштабах, наблюдалось на фоне медленно возмущенного СВ, что согласуется с представленными в настоящем разделе результатами статистического анализа.

Для кинетических масштабов с учетом больших стандартных отклонений не удалось выделить зависимости наклона спектра от типа набегающего потока СВ. Отсутствие зависимости свидетельствует о том, что процессы диссипации энергии в плазме зависят от локальных процессов в плазме и не связаны с крупномасштабными явлениями в СВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе на основе трех пересечений спутником *Спектр-Р* ОЗУВ, а также на основе статистического анализа характеристик турбулентности за ОЗУВ для различных крупномасштабных типов течения солнечного ветра, исследовано влияние характеристик турбулентности солнечного ветра на турбулентный каскад в магнитослое.

Показано, что при пересечении плазмой ОЗУВ происходит выполаживание спектров флуктуаций потока ионов в диапазоне частот, соответствующем инерционной области турбулентного каскада. Этот результат, полученный на отдельных пересечениях ОЗУВ, подтверждает результаты, представленные ранее на основе статистического анализа спектров флуктуации потока ионов [24] и флуктуаций модуля магнитного поля [10]. Однако, в отличие от результатов статистического анализа,

показано, что изменение характеристик спектров происходит по-разному для различных условий в набегающем потоке СВ. Так, для периодов СВ типа Sheath наблюдается наиболее сильное уплощение спектров за ОЗУВ, тогда как в периоды медленного стационарного течения СВ изменения турбулентного каскада могут быть незначительны. Можно заключить, что при пересечении плазмой ОЗУВ происходит перераспределение энергии в каскаде, что приводит к его отклонению от формы, характерной для развитой турбулентности, при этом характер перераспределения энергии определяется свойствами набегающего потока плазмы.

Показано, что за ОЗУВ происходит слабое увеличение модуля показателя степени для спектров флуктуаций потока ионов на кинетических масштабах по сравнению с наблюдаемым перед ОЗУВ. Полученный результат согласуется с выводами, сделанными в статистических исследованиях [10, 24]. Однако, для двух из трех рассмотренных в данной работе пересечений значения показателей наклонов для указанных масштабов как перед, так и за ОЗУВ отличаются от средних значений статистических распределений. Таким образом, наблюдается тенденция к линейной зависимости наклона кинетической части спектра перед и за ОЗУВ, что свидетельствует о схожести механизмов диссипации перед и за фронтом. Можно заключить, что, как правило, за фронтом ОЗУВ диссипация энергии идет более эффективно, что сопровождается укрупнением спектра. При этом механизм диссипации определяется, по-видимому, процессами перед ОЗУВ.

Выявлено, что характеристики турбулентного каскада в МСЛ зависят от типа набегающего потока СВ. В периоды СВ типа CIR количество спектров с пиком за ОЗУВ существенно больше, чем для остальных типов СВ и чем наблюдается в среднем в МСЛ. Таким образом, взаимодействие СВ типа CIR с ОЗУВ сопровождается увеличением волновой активности в МСЛ. При этом, в периоды СВ типа Sheath за ОЗУВ чаще наблюдаются спектры с плато, что свидетельствует об увеличении вклада кинетических альфвеновских волн в формирование каскада.

Проведенный анализ свидетельствует о трансформации турбулентного каскада при пересечении плазмой ОЗУВ, что необходимо учитывать при анализе быстрых флуктуаций параметров плазмы в магнитослое.

Авторы выражают благодарность своим коллегам в ИКИ РАН, в НПО им. С.А. Лавочкина и в Карловом Университете (Прага, Чехия) за помощь в разработке, отладке, калибровке, полетном контроле, а также за сбор, передачу и первичную обработку научной информации с прибора БМСВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bruno R., Carbone V. The solar wind as a turbulence laboratory // *Living Reviews in Solar Physics*. 2003. V. 10. P. 2.
2. Alexandrova O., Chen C.H.K., Sorriso-Valvo L. et al. Solar Wind Turbulence and the Role of Ion Instabilities // *Space Science Reviews*. 2013. V. 178. P. 101.
3. Chen C.H.K. Recent progress in astrophysical plasma turbulence from solar wind observations // *J. Plasma Physics*. 2016. V. 82. 535820602. <https://doi.org/10.1017/S0022377816001124>
4. Shevryev N.N., Zastenker G.N. Some features of the plasma flow in the magnetosheath behind quasi-parallel and quasi-perpendicular bow shocks // *Planetary and Space Science*. 2005. V. 53. № 1–3. P. 95. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2004.09.033>
5. Shevryev N.N., Zastenker G.N., Eiges P.E. et al. Low frequency waves observed by Interball-1 in foreshock and magnetosheath // *Advances in Space Research*. 2006. V. 37. № 8. P. 1516. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.07.072>
6. Alexandrova O., Mangeney A., Maksimovic M. et al. Alfvén vortex filaments observed in magnetosheath downstream of a quasi-perpendicular bow shock // *J. Geophysical Research*. 2006. V. 111. № A12. A12208. <https://doi.org/10.1029/2006JA011934>
7. Alexandrova O., Lacombe C., Mangeney A. Spectra and anisotropy of magnetic fluctuations in the Earth's magnetosheath: Cluster observations // *Annales Geophysicae*. 2008. V. 26. № 11. P. 3585. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-3585-2008>
8. Sahraoui F., Belmont G., Rezeau L. et al. Anisotropic Turbulent Spectra in the Terrestrial Magnetosheath as Seen by the Cluster Spacecraft // *Physical Review Letters*. 2006. V. 96. № 7. 075002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.075002>
9. Huang S.Y., Sahraoui F., Deng X.H. et al. Kinetic turbulence in the terrestrial magnetosheath: Cluster observations // *Astrophysical J.* 2014. V. 789. № 2. L28. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/789/2/L28>
10. Huang S.Y., Hadid L.Z., Sahraoui F. et al. On the Existence of the Kolmogorov Inertial Range in the Terrestrial Magnetosheath Turbulence // *Astrophysical J. Letters*. 2017. V. 836. № 1. L10.
11. Козак Л.В., Пилипенко В.А., Чугунова О.М. и др. Статистический анализ турбулентности форшоковой области и магнитослоя земли // *Космич. исслед.* 2011. Т. 49. № 3. С. 202. (*Cosmic Research*. P. 194).
12. Breuillard H., Yordanova E., Vaivads A. et al. The effects of kinetic instabilities on small-scale turbulence in Earth's magnetosheath // *Astrophysical J.* 2016. V. 829. № 1. P. 54. <https://doi.org/10.3847/0004-637X/829/1/54>
13. Chen C.K.H., Boldyres S. Nature of Kinetic Scale Turbulence in the Earth's Magnetosheath // *Astrophysical J.* 2017. V. 842. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa74e0>
14. Roberts O.W., Toledo-Redondo S., Perrone D. et al. Ion-scale kinetic Alfvén turbulence: MMS measurements of the Alfvén ratio in the magnetosheath // *Geophysical Research Letters*. 2018. V. 45. P. 7974. <https://doi.org/10.1029/2018GL078498>

15. *Blecki J., Kossacki K.* ELF/ULF plasma waves observed on PROGNOZ-8 near the magnetopause // *Artificial Satellites Space Physics*. 1987. V. 22. № 4.
16. *Vaisberg O.L., Smirnov V.N.* Further analysis of non-linear density fluctuations in the foot of quasi-perpendicular shock // *Advances in Space Research*. 1995. V. 15. № 8/9. P. 297.
17. *Lacombe C., Steinberg J.-L., Harvey C.C. et al.* Density fluctuations measured by ISEE 1-2 in the Earth's magnetosheath and the resultant scattering of radio waves // *Annales Geophysicae*. 1997. V. 15. № 4. P. 387. <https://doi.org/10.1007/s00585-997-0387-5>
18. *Schekochihin A.A., Cowley S.C., Dorland W. et al.* Astrophysical gyrokinetics: kinetic and fluid turbulent cascades in magnetized weakly collisional plasmas // *Astrophysical Journal Supplement Series*. 2009. V. 182. № 1. P. 310. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/182/1/310>
19. *Застенкер Г.Н., Шафранкова Я., Немецек З. и др.* Быстрые измерения параметров солнечного ветра с помощью прибора БМСВ // *Космич. исслед.* 2013. Т. 51. № 2. С. 88. (*Cosmic Research*. P. 78).
20. *Šafránková J., Němeček Z., Přejch L. et al.* Fast Solar Wind Monitor (BSMW): Description and First Results // *Space Science Reviews*. 2013. V. 175. P. 165.
21. *Riazantseva M.O., Budaev V.P., Rakhmanova L.S. et al.* Comparison of properties of small-scale ion flux fluctuations in the flank magnetosheath and in the solar wind // *Advances in Space Research*. 2016. V. 58. № 2. P. 166. <https://doi.org/10.1016/J.ASR.2015.12.022>
22. *Rakhmanova L., Riazantseva M., Zastenke G.* Plasma fluctuations at the flanks of the Earth's magnetosheath at ion kinetic scales // *Annales Geophysicae*. 2016. V. 34. P. 1011.
23. *Rakhmanova L., Riazantseva M., Zastenker G. et al.* Kinetic-scale ion flux fluctuations behind the quasi-parallel and quasi-perpendicular bow shock // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2018. V. 123.
24. *Рахманова Л.С., Рязанцева М.О., Застенкер Г.Н. и др.* Влияние магнитопаузы и головной ударной волны на характеристики турбулентности плазмы в магнитослое Земли // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2018. Т. 58. № 6. С. 749.
25. *Czaykowska A., Bauer T.M., Treumann R.A. et al.* Magnetic field fluctuations across the Earth's bow shock // *Annales Geophysicae*. 2001. V. 19. № 3. P. 275. <https://doi.org/10.5194/angeo-19-275-2001>
26. *Spreiter J.R., Stahara S.S.* A new predictive model for determining solar wind-terrestrial planet interactions // *J. Geophysical Research*. 1966. V. 85. P. 6769. <https://doi.org/10.1029/JA085iA12p06769>
27. *Neugebauer M., Wu C.S., Huba J.D.* Plasma fluctuations in the solar wind // *J. Geophysical Research*. 1978. V. 83. № A3. P. 1027. <https://doi.org/10.1029/JA083iA03p01027>
28. *Pitňa A., Šafránková J., Němeček Z. et al.* Density fluctuations upstream and downstream of interplanetary shocks // *Astrophysical J.* 2016. V. 819. № 1. P. 41. <https://doi.org/10.3847/0004-637X/819/1/41>
29. *Krasnosel'skikh V., Balikhin M.A., Alleyne H.St.C. et al.* On the nature of low frequency turbulence in the foot of strong quasi-perpendicular shocks // *Advances in Space Research*. 1991. V. 11. № 9. P. 15.
30. *Balikhin M.A., Walker S.N., Dudok de Wit T. et al.* Non-stationarity and low frequency turbulence at a quasi-perpendicular shock front // *Advances in Space Research*. 1997. V. 20. № 415. P. 129.
31. *Šafránková J., Němeček Z., Němec F. et al.* Solar wind density spectra around the ion spectral break // *Astrophysical J.* V. 803. № 2. P. 107. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/803/2/107>
32. *Riazantseva M., Budaev V., Rakhmanova L. et al.* Variety of shapes of solar wind ion flux spectra: Spektr-R measurements // *J. Plasma Physics*. 2017. V. 83. № 4. 705830401. <https://doi.org/10.1017/S0022377817000502>
33. *Schwartz S.J., Burgess D., Moses J.J.* Low-frequency waves in the Earth's magnetosheath: present status // *Annales Geophysicae*. 1996. V. 14. № 11. P. 1134. <https://doi.org/10.1007/s00585-996-1134-z>
34. *Gagua I.T., Gagua T.I., Zastenker G.N.* Determination of a solar wind ion flux value and direction using a set of integral Faraday cups for the fast monitor of solar wind // *WDS'09, Proceedings of Contributed Papers*. 2009. Part II. P. 22–29. MATFYZPRESS.
35. *Riazantseva M.O., Budaev V.P., Zelenyi L.M. et al.* Dynamic properties of small-scale solar wind plasma fluctuations // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2015. V. 373. № 2041. P. 20140146. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0146>
36. *Pitňa A., Šafránková J., Němeček Z. et al.* Decay of Solar Wind Turbulence behind Interplanetary Shocks // *Astrophysical J.* 2017. V. 844. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa7bef>
37. *Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г. и др.* Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // *Космич. исслед.* 2009. Т. 47. № 2. С. 99–113. (*Cosmic Research*. P. 81).
38. *Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Nikolaeva N.S. et al.* Dynamics of large-scale solar-wind streams obtained by the double superposed epoch analysis // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2015. V. 120. № 9. P. 7094. <https://doi.org/10.1002/2015JA021274>
39. *Verigin M.I., Tátrallyay M., Erdős G. et al.* Magnetosheath – Interplanetary medium reference frame: Application for a statistical study of mirror type waves in the terrestrial plasma environment // *Advances in Space Research*. 2006. V. 37. № 3. P. 515. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.03.042>
40. *Chandran B.D.G., Quataert E., Howes G.G. et al.* Constraining low-frequency alfvénic turbulence in the solar wind using density-fluctuation measurements // *Astrophysical Journal*. 2009. V. 707. № 2. P. 1668. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/707/2/1668>
41. *Рязанцева М.О., Рахманова Л.С., Застенкер Г.Н. и др.* Особенности спектральных характеристик плазменных флуктуаций в различных крупномасштабных потоках солнечного ветра // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2019. Т. 59. № 2. С. 139.