

УДК 523.62-726

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЕННЫХ ФЛУКТУАЦИЙ В РАЗЛИЧНЫХ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ПОТОКАХ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

© 2019 г. М. О. Рязанцева^{1, *}, Л. С. Рахманова¹, Г. Н. Застенкер¹,
Ю. И. Ермолаев¹, И. Г. Лодкина¹

¹Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), г. Москва, Россия

*e-mail: orearm@gmail.com

Поступила в редакцию 04.04.2018 г.

После доработки 04.04.2018 г.

Принята к публикации 27.09.2018 г.

Турбулентные характеристики флуктуаций плазмы солнечного ветра (СВ) могут значительно меняться в зависимости от условий в СВ. Различные типы крупномасштабных потоков, такие как невозмущенный медленный солнечный ветер, быстрый солнечный ветер, ЕЈЕСТА (межпланетный корональный выброс массы), МС (магнитное облако), СІР (область сжатия на границе быстрых и медленных потоков), SHEATH (область сжатия перед ЕЈЕСТА/МС), обычно характеризуются специфическими значениями плазменных параметров, которые могут влиять на формирование турбулентного каскада. В данной работе анализируются свойства спектров флуктуаций потока ионов в СВ в области перехода от магнитогидродинамического (МГД) к кинетическому масштабу на основе измерений с высоким временным разрешением с помощью плазменного спектрометра БМСВ на борту космического аппарата (КА) СПЕКТР-Р. Рассмотрены интервалы наблюдений внутри различных крупномасштабных типов течений СВ и проведено сравнение основных характеристик турбулентности в таких течениях. Показано, что свойства спектров флуктуаций могут сильно зависеть от типа СВ, в частности, внутри областей МС и областей сжатия перед ними, а также областей СІР характерно сильное укручение спектра флуктуаций на кинетических масштабах. Характеристики спектров флуктуаций на МГД масштабах в меньшей степени зависят от типов крупномасштабных структур солнечного ветра, и, в среднем, соответствуют колмогоровским спектрам. Однако можно отметить, что в медленном невозмущенном солнечном ветре наблюдаются наименьшие показатели наклона спектра, что свидетельствует об отличиях от традиционной колмогоровской модели развитой турбулентности.

DOI: 10.1134/S0016794019020111

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время возрос интерес к изучению каскада турбулентных флуктуаций в плазме солнечного ветра (СВ), в особенности на масштабах порядка ионного и электронного гирорадиусов. Это связано с активным развитием моделей СВ, учитывающих не только классический МГД подход, но и кинетические эффекты [Howes et al., 2008; Schekochihin et al., 2009; Servidio et al., 2014]. В частности, исследование спектра турбулентности в широком диапазоне масштабов позволяет прояснить механизмы перекачки энергии в турбулентном каскаде между областями раскачки и диссипации с последующим нагревом и ускорением частиц СВ. Вплоть до недавнего времени эти исследования были ограничены отсутствием систематических измерений плазменных параметров в СВ с временным разрешением достаточным для изучения кинетического интервала тур-

булентного каскада. Опубликованные работы в этом направлении носили эпизодический характер [Unti et al., 1973; Celnikier et al., 1987; Kellogg and Horbury, 2005; Chen et al., 2012] вплоть до появления в 2011 г. измерений плазменных параметров с помощью прибора БМСВ на КА СПЕКТР-Р с рекордным временным разрешением ≈ 31 мс [Застенкер и др. 2013; Šafránková et al., 2013]. В то же время, исследования флуктуаций межпланетного магнитного поля (ММП) с достаточно высоким временным разрешением регулярно ведутся в течение последних двух десятилетий (например, обзор Alexandrova et al., [2013]), но не могут дать полной картины без соответствующих измерений флуктуаций плазменных параметров. Спектр турбулентных флуктуаций межпланетного магнитного поля (ММП) в области перехода от МГД к кинетическому масштабу, как правило, может быть описан двумя линейными зависимостями

(на каждом из масштабов) с четким изломом при переходе от одного к другому масштабу [Alexandrova et al., 2013; Bruno et al., 2013]. При этом спектр на МГД масштабе в среднем соответствует наклону $-5/3$ классической модели Колмогорова [Колмогоров, 1941; Frish, 1995]. На ионно-кинетических масштабах спектр становится круче и его наклон в среднем достигает -2.8 [Alexandrova et al., 2013; Bruno et al., 2013]. В работах [Howes et al., 2008; Schekochihin et al., 2009] исследовано укрупнение спектров в результате возрастания вклада кинетической альвеновской турбулентности. Однако данная модель предсказывает меньший по модулю по сравнению с экспериментально наблюдаемым показатель наклона спектра $\sim -7/3$. В работе [Howes et al., 2008] показано, что более высокие показатели наклона, наблюдаемые в эксперименте, возникают при учете затухания Ландау. Более сильное укрупнение спектров также предсказывается моделями учитывающими перемежаемость плазмы [Boldyrev and Perez, 2012] и фрактальность ее структуры [Зеленый и Милованов, 2004]. Для спектров флуктуации направленной и тепловой скорости СВ также характерна форма с двумя характеристическими наклонами и четкой точкой излома [Šafránková et al., 2016], тогда как на спектрах флуктуаций плотности чаще наблюдается уплощение в окрестности излома [Unti et al., 1973; Celnikier et al., 1987; Šafránková et al., 2015]. В работе [Chandran et al., 2009] показано, что подобное уплощение может формироваться в результате суперпозиции спектров флуктуаций плотности альвеновской и кинетической альвеновской турбулентности. Кроме того, в результате различного вклада кинетических альвеновских волн, различных плазменных неустойчивостей и отдельных когерентных структур могут формироваться специфические особенности на спектрах флуктуаций в окрестности перехода между МГД и кинетическими масштабами [Lion et al. 2016]. Данные особенности часто наблюдаются в спектрах флуктуаций потока ионов [Рязанцева и др., 2017а; Riazantseva et al., 2017], однако механизмы, ответственные за формирование той или иной формы спектра флуктуаций, пока полностью не описаны [Howes et al. 2008]. Характерная частота перехода к кинетическому масштабу зависит от плазменного параметра бета β_p (отношения теплового давления плазмы к магнитному) [Chen et al., 2014а; Šafránková et al., 2016]. Величина β_p , как правило, отражает тип течения СВ. Так, например, $\beta_p \ll 1$ характерно для МС и ЕЈЕСТА, тогда как $\beta_p \geq 1$ типично для областей сжатия и гелиосферного токового слоя (см. например [Ермолаев и др., 2009]). Кроме того, в ряде работ [Bruno et al., 2014; Riazantseva et al., 2017], отмечалось, что форма спектра флуктуаций может зависеть не только от локальных значений

плазменных параметров, но и от глобальных свойств течения СВ, однако систематическое сравнение турбулентных характеристик в различных крупномасштабных структурах СВ ранее не проводилось. В данной работе анализируются характеристики спектров турбулентных флуктуаций потока ионов СВ на МГД и кинетических масштабах в разных типах крупномасштабных течений СВ. В частности, особое внимание уделяется вопросу об аномальном укрупнении спектров флуктуации на кинетических масштабах, так как ранее была обнаружена четкая связь вероятности появления аномальных укрупнений с крупномасштабными параметрами окружающей плазмы [Riazantseva et al., 2017].

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИХ АНАЛИЗА

В работе используются данные с высоким временным разрешением, полученные с помощью прибора БМСВ [Застенкер и др. 2013; Šafránková et al. 2013] в рамках эксперимента ПЛАЗМА-Ф на борту высокоапогейного КА СПЕКТР-Р [Зеленый и др., 2013]. Систематические измерения вектора потока ионов в СВ и магнитослое (МСЛ) с временным разрешением в 31 мс, а также измерения плотности, скорости, температуры протонов и относительного содержания ионов гелия с разрешением, в 3 с (свипирующий режим) проводятся с 2011 г. по настоящее время. В ряде случаев (в адаптивном режиме) измерения плотности, скорости и температуры протонов доступны с максимальным временным разрешением в 31 мс. В работе исследовались максимально длинные временные ряды данных по потоку ионов СВ с максимальным временным разрешением. При этом, измерения параметров СВ используются только для вычисления средних величин на исследованных интервалах. Высокое временное разрешение измерений позволяет анализировать свойства турбулентных плазменных флуктуаций на масштабах порядка ионного гирорadiusа и выше. Детальное описание прибора и принципов его работы приведено в работах [Застенкер и др., 2013; Šafránková et al., 2013]. Следует также отметить, что в связи с отсутствием измерений межпланетного магнитного поля (ММП) на борту КА СПЕКТР-Р, были привлечены данные прибора MFI на КА WIND [Lepping et al., 1995] доступные на ресурсе CDAWeb (<https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov>). Временная привязка измерений на КА WIND, как правило, ведущем измерения на значительном удалении от КА СПЕКТР-Р ($\sim 150\text{--}250 \text{ Re}$), осуществлялась по времени распространения СВ и уточнялась путем анализа совпадения границ крупномасштабных плазменных структур.

Высокоапогейная орбита КА СПЕКТР-Р [Зеленый и др., 2013] и постоянная ориентация при-

бора БМСВ на Солнце ($\pm(5^\circ-10^\circ)$) позволяют проводить длительные непрерывные наблюдения в СВ. Однако в результате ограниченных возможностей действующего телеметрического канала на текущий момент в центр сбора информации на Земле передано лишь $\sim 10\%$ данных прибора, измеренных с высоким временным разрешением. Для данной работы были отобраны длительные (не менее 3 часов) ряды измерений величины потока ионов СВ в 2011–2015 гг, составляющие суммарно ~ 500 ч измерений. Для анализа свойств спектров флуктуаций потока ионов каждый интервал делился на более короткие подинтервалы, длина которых составляла ≈ 17 мин. Длина интервала определялась оптимальным для быстрого преобразования Фурье количеством точек и минимальными исследуемыми частотами спектра флуктуаций $\sim 10^{-2}$ Гц. Каждый последующий рассматриваемый интервал сдвигался на время равное половине длительности исходного интервала (т.е. на ≈ 8.5 мин). Для вычисления частотного спектра флуктуаций потока ионов на текущем интервале использовалось быстрое преобразование Фурье с последующей фильтрацией. Используемые данные позволяют вычислять спектры флуктуаций на частотах до 16 Гц, однако ранее было показано [Chen et al., 2014б], что на частотах выше ~ 10 Гц уровень шумов усилителя возрастает, а соотношение сигнал шум падает, что необходимо учитывать в случае низких значениях потока. Поэтому рассмотренные в данной работе спектры флуктуаций, вычисляются в диапазоне частот $10^{-2}-10$ Гц.

Классическая форма спектра флуктуаций с двумя наклонами (на МГД и кинетическом масштабах, соответственно) и четкой точкой излома наблюдается в СВ лишь в 50% случаев [Рязанцева и др., 2017а; Riazantseva et al., 2017]. В остальных случаях могут наблюдаться различные особенности в области перехода между масштабами (такие как плато, пик, отсутствие излома, аномальное укручение). Тем не менее, вне зависимости от формы спектров флуктуаций можно выделить участки спектра, соответствующие МГД и кинетическому масштабам, исключив область перехода между масштабами, которая может содержать плато или пик на спектре флуктуаций. Таким образом, показатели наклонов спектров на данных масштабах, как правило, могут быть однозначно определены, тогда как частота излома спектра может быть определена только для спектров классического вида. Поэтому в данной работе анализировались только показатели наклонов спектров (как на МГД, так и на кинетическом масштабах) для всей совокупности наблюдений в целом, без разделения на типы спектров по их форме.

На рисунке 1 представлены примеры спектров флуктуаций потока ионов для двух интервалов: в

медленном СВ 16:08–16:25 UT 20.06.2014 (серая сплошная кривая) и в области SHEATH перед MC 12:26–12:43 UT 30.09.2012 (черная пунктирная кривая). Спектры нормированы по мощности для более удобного сравнения их между собой. Кроме средних показателей наклона спектра на МГД и кинетическом масштабах (P_1 и P_2 , соответственно) для определения степени укручения спектров на кинетическом масштабе также определялись показатели наклонов в двух диапазонах частот 3–5 Гц и 6–8 Гц (соответствующие области частот отмечены на рисунке светло-серым и темно-серым прямоугольниками). На МГД масштабе наклоны спектров флуктуаций приблизительно равны (для первого интервала: $P_1 = -1.62 \pm 0.04$; для второго интервала: $P_1 = -1.67 \pm 0.07$), и близки к показателю наклона классического колмогоровского спектра $-5/3$. На кинетическом масштабе, спектры, как и ожидается, укрущаются (см. Введение), а их показатели наклонов в среднем равны $P_2 = -3.2 \pm 0.2$ для первого интервала, и $P_2 = -3.6 \pm 0.2$ для второго интервала. Следует отметить, что в первом случае во всем диапазоне частот кинетического интервала спектр не меняет показателей наклона ($P_2(3-5 \text{ Гц}) = -3.3 \pm 0.2$, $P_2(6-8 \text{ Гц}) = -3.3 \pm 0.2$), т.е. спад спектра может быть аппроксимирован линейной. Тогда как для второго случая спектр нелинейно укрущается с увеличением частоты ($P_2(3-5 \text{ Гц}) = -3.3 \pm 0.2$, $P_2(6-8 \text{ Гц}) = -4.2 \pm 0.2$). Сравнение показателей наклонов в выделенных диапазонах частот показывает степень укручения спектра флуктуаций на кинетических масштабах. Зависимость близка к линейной, если показатели наклонов на всех диапазонах совпадают. Используя описанную методику для всех типов СВ было рассмотрено ~ 3262 спектра, что более чем в 4 раза превышает статистику в работах [Рязанцева и др., 2017а; Riazantseva et al., 2017].

Для всех рассмотренных интервалов с помощью каталога Ермолаева и др. (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/> [Ермолаев и др., 2009]) была проведена привязка к крупномасштабным типам СВ, таким как: межпланетные корональные выбросы массы (ЕJECTA), магнитные облака (MC), области сжатия, образующиеся в результате взаимодействия высокоскоростного потока СВ из корональной дыры с медленным потоком из пояса стримеров (CIR), области сжатия перед быстрым ЕJECTA/MC (SHEATH), области высокоскоростного СВ (как правило, потоки из корональных дыр), а также области невозмущенного медленного солнечного ветра (как правило, потоки из корональных стримеров). Перед областями сжатия CIR и SHEATH могут наблюдаться межпланетные ударные волны (МУВ), которые могут вносить определенный вклад в вариации параметров СВ и характеристики турбулентного кас-

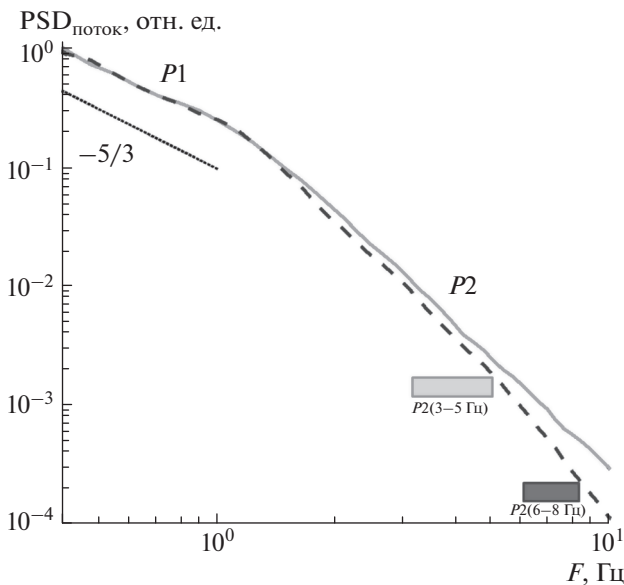


Рис. 1. Примеры нормированных спектров флуктуаций потока ионов СВ на интервалах 16:08–16:25 UT 20.06.2014 (серая сплошная кривая) и 12:26–12:43 UT 30.09.2012 (черная пунктирная кривая). Прямоугольниками отмечены интервалы частот, на которых проводится расчет показателей наклона спектра в высокочастотной области 3–5 Гц (светло-серый прямоугольник) и 6–8 Гц (темно-серый прямоугольник). Прерывистой черной прямой показан наклон классического колмогоровского спектра флуктуаций.

када плазменных флуктуаций (например, Pitňa et al. [2016], Рязанцева и др. [2017б]), однако этот эффект наблюдается непосредственно вблизи

фронтов МУВ. Присутствие МУВ, количество которых сравнительно невелико [Ермолаев и др., 2009], не может значимым образом повлиять на анализируемую в работе статистику. Поэтому на данном этапе исследований были проанализированы все случаи независимо от наличия/отсутствия МУВ перед областями сжатия.

В таблице 1 представлены процентные соотношения между интервалами, наблюдаемыми в различных крупномасштабных течениях СВ, а также средние величины параметров плазмы и ММП для отобранных интервалов. Следует отметить, что эти величины могут несколько отличаться от параметров в среднем характерных для тех или иных крупномасштабных структур СВ [Ермолаев и др. 2009]. Это связано с ограниченностью выборки, и, в частности, с инструментальными особенностями прибора, не позволяющего проводить измерения скорости в СВ более чем ~ 700 км/с [Pitňa et al., 2016].

3. АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЛУКТУАЦИЙ ПОТОКА ИОНОВ НА МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ И КИНЕТИЧЕСКОМ МАСШТАБАХ В РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Расширенная статистика спектров флуктуаций потока ионов в СВ, рассмотренная в данной работе, позволила провести сортировку по крупномасштабным типам СВ и выявить разницу между характеристиками спектров флуктуаций

Таблица 1. Средние значения параметров плазмы и ММП, а также показателей наклонов спектров на МГД и кинетических масштабах для разных крупномасштабных типов СВ

	Все интервалы	Медленный СВ	Быстрый СВ	ЕЈЕСТА	SHEATH–ЕЈЕСТА	МС	SHEATH–МС	CIR
Количество интервалов	3262	1241	301	717	185	292	197	329
Количество интервалов, %	100%	38.0%	9.2%	22.0%	5.7%	9.0%	6.0%	10.1%
$\langle N \rangle$, см ⁻³	11.2 ± 0.1	10.4 ± 0.2	8.1 ± 0.3	9.6 ± 0.2	10.4 ± 0.3	8.0 ± 0.3	16.0 ± 0.6	20.6 ± 0.7
$\langle V \rangle$, км/с	406 ± 1	368 ± 1	471 ± 1	420 ± 2	412 ± 1	483 ± 2	446 ± 5	359 ± 2
$\langle T \rangle$, эВ	6.6 ± 0.1	6.1 ± 0.2	12.1 ± 0.6	2.9 ± 0.1	9.1 ± 0.3	5.0 ± 0.2	12 ± 0.5	7.9 ± 0.3
$\langle Na/Np \rangle$, %	3.8 ± 0.1	3.5 ± 0.1	2.5 ± 0.1	3.8 ± 0.1	3.1 ± 0.1	8.5 ± 0.2	3.2 ± 0.1	3.1 ± 0.1
$\langle B \rangle$, нТл	7.6 ± 0.1	7.1 ± 0.2	7.7 ± 0.2	6.5 ± 0.1	7 ± 0.2	8.5 ± 0.3	9.2 ± 0.2	10.3 ± 0.2
$\langle \beta_p \rangle$	0.72 ± 0.02	0.76 ± 0.02	0.93 ± 0.08	0.54 ± 0.06	0.96 ± 0.07	0.57 ± 0.05	0.97 ± 0.06	0.61 ± 0.03
$\langle P1 \rangle$	-1.6 ± 0.01	-1.53 ± 0.01	-1.60 ± 0.02	-1.71 ± 0.02	-1.55 ± 0.03	-1.56 ± 0.02	-1.66 ± 0.02	-1.63 ± 0.02
$\langle P2 \rangle$	-2.8 ± 0.01	-2.53 ± 0.02	-2.76 ± 0.04	-2.80 ± 0.03	-2.99 ± 0.03	-3.18 ± 0.02	-3.20 ± 0.04	-3.18 ± 0.03
$\langle P2 \rangle$, 3–5 Гц	-2.76 ± 0.01	-2.59 ± 0.02	-2.78 ± 0.03	-2.76 ± 0.02	-2.95 ± 0.03	-2.92 ± 0.03	-3.00 ± 0.03	-3.02 ± 0.02
$\langle P2 \rangle$, 6–8 Гц	-2.88 ± 0.02	-2.48 ± 0.03	-2.75 ± 0.05	-2.87 ± 0.04	-3.04 ± 0.05	-3.57 ± 0.04	-3.56 ± 0.06	-3.37 ± 0.04

потоков ионов. На рисунке 2 представлена зависимость средних показателей наклона спектров на кинетических масштабах от аналогичных показателей на МГД масштабах для различных структур СВ. Для всех рассмотренных интервалов в среднем показатели наклонов равны соответственно $\langle P_1 \rangle = -1.6$ и $\langle P_2 \rangle = -2.8$ (см. табл. 1), что согласуется с наблюдениями флуктуаций как плазменных так и магнитных параметров в СВ и современными моделями турбулентности (см. введение). Однако, можно отметить, что средние показатели наклонов могут значительно отличаться для различных крупномасштабных структур СВ (см. рис. 1 и табл. 1). Так для медленного СВ характерны более пологие наклоны как в МГД, так и на кинетических масштабах. При этом показатель наклона на МГД масштабах составляет $\langle P_1 \rangle = -1.53$, что заметно отличается от наклона спектра $-5/3$ в классическом колмогоровском подходе. Для областей быстрого СВ, МС и SHEATH перед EJECTA также наблюдаются значения наклона на МГД масштабах по модулю ниже показателей характерных для колмогоровского спектра. Области EJECTA, SHEATH перед МС и CIR характеризуются наклонами близкими к колмогоровским.

На кинетических масштабах показатели наклона, наиболее близкие к средним в СВ, наблюдаются в спектрах в быстром СВ и внутри EJECTA. В медленном СВ наблюдаются показатели наклона по модулю меньше чем средние в СВ. Наиболее крутые спектры на кинетических масштабах (с максимальными средними по модулю значениями показателя наклона) характерны для интервалов внутри областей МС, SHEATH (в особенности перед МС), а также области CIR. Следует отметить, что последняя особенность может быть связана, в частности, с аномальным укрупнением спектров флуктуаций на кинетических масштабах, наблюдающимся в ряде случаев в СВ [Rizantseva et al., 2017]. Ниже мы представляем результаты анализа степени укрупнения спектров флуктуаций на кинетических масштабах для различных типов СВ. На рис. 3 представлен набор распределений показателей наклонов спектров флуктуаций в двух диапазонах частот (3–5 Гц и 6–8 Гц) для каждого рассмотренного крупномасштабного типа СВ. Средние значения показателей наклона в указанных диапазонах представлены в табл. 1. На рис. 3а приведены распределения для всех анализируемых интервалов. Максимумы распределений и средние значения показателей наклонов в обоих диапазонах частот близки, однако распределение в диапазоне 6–8 Гц значительно шире аналогичного распределения в диапазоне 3–5 Гц, что отражает наблюдение значительного числа событий с укрупнением спектров на более высоких частотах. Аналогичная ситуация наблюдается для интервалов внутри областей

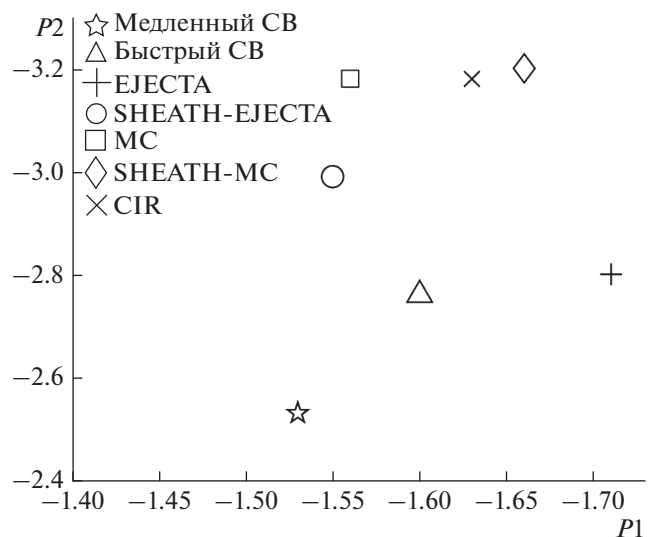


Рис. 2. Зависимость средних показателей наклона спектра на кинетических масштабах P_2 от средних показателей наклона на МГД масштабах P_1 . Разные крупномасштабные типы СВ отмечены маркерами: медленный СВ – звездочка, быстрый СВ – треугольник, EJECTA – прямой крест, SHEATH перед EJECTA – круг, МС – квадрат, SHEATH перед МС – ромб, CIR – косой крест.

EJECTA (рис. 3в) и SHEATH перед EJECTA (рис. 3д). Существенно иначе выглядит ситуация для спектров флуктуаций в невозмущенном медленном СВ (рис. 3б) и быстром СВ (рис. 3е): распределения показателей наклонов на различных диапазонах частот практически совпадают, а средние значения наклонов (см. табл. 1) почти не меняются. Таким образом можно утверждать, что для этих типов СВ не характерно укрупнение спектров флуктуаций на высоких частотах. Напротив, для спектров флуктуаций, наблюдающихся внутри МС (рис. 3е) и SHEATH перед МС (рис. 3з), четко видно, что распределение показателей наклонов спектра в диапазоне частот 6–8 Гц значительно смещено в сторону больших по модулю показателей наклонов спектра относительно аналогичного распределения в диапазоне частот 3–5 Гц. Таким образом, можно заключить, что в данном случае часто наблюдается укрупнение спектров флуктуаций на высоких частотах. Для спектров, наблюдающихся внутри областей CIR (рис. 3ж), также можно отметить некоторую тенденцию к укрупнению на высоких частотах, однако распределение показателей наклонов в диапазоне 6–8 Гц очень широкое, и не имеет четко выраженного максимума. Следует также отметить, что разница между показателями наклонов спектров в различных типах СВ наблюдается не только в диапазоне 6–8 Гц, но также и в диапазоне 3–5 Гц (см. табл. 1). Так минимальные по модулю наклоны спектров ≈ -2.6 наблюдаются для низко-

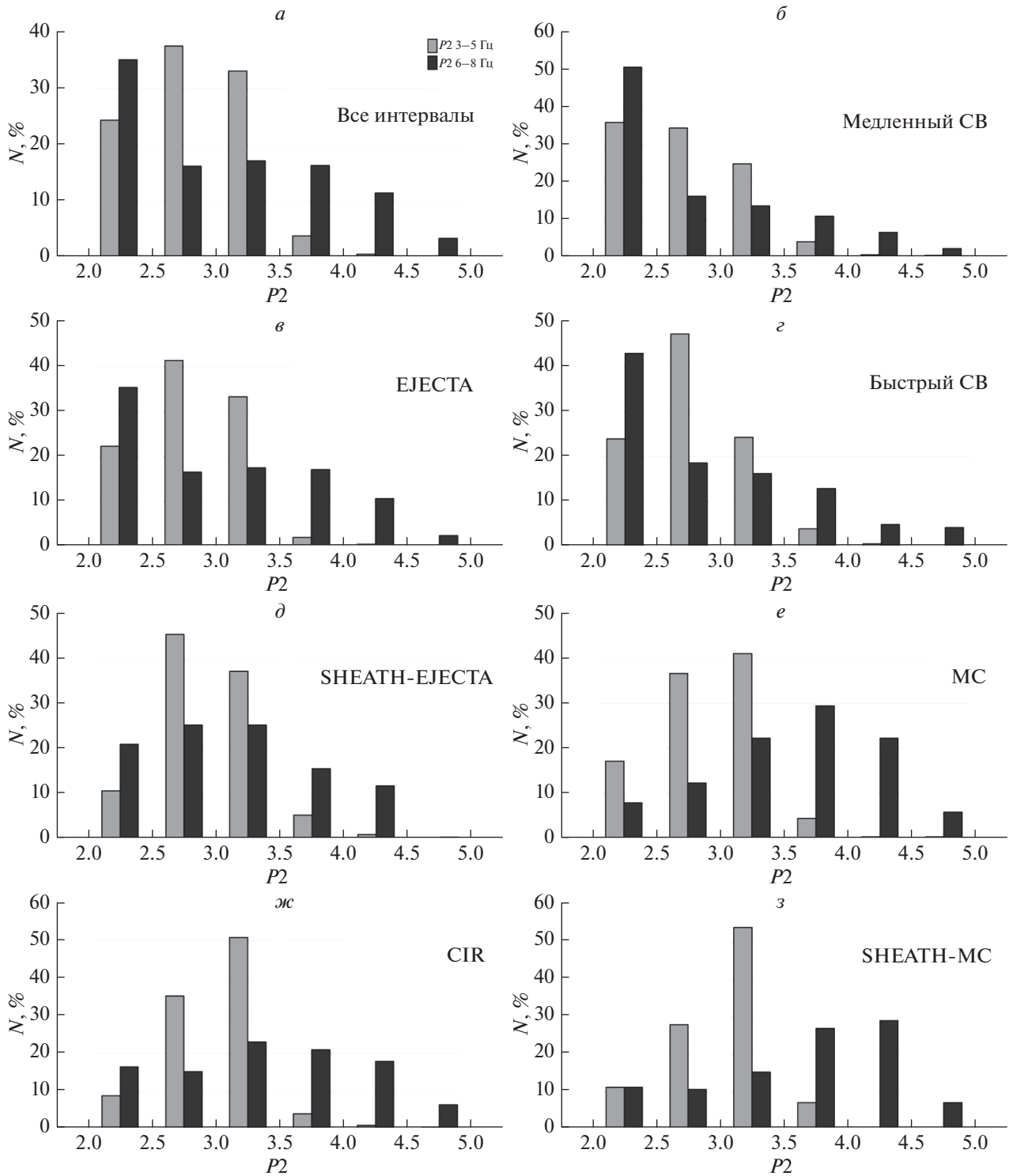


Рис. 3. Распределения показателей наклона спектра флуктуаций потока иона в диапазонах частот 3–5 Гц (светло-серые бины) и 6–8 Гц (темно-серые бины) для различных крупномасштабных типов СВ: (*a*) – все интервалы, (*б*) – медленный СВ, (*в*) – ЕЈЕСТА, (*г*) – быстрый СВ, (*д*) – SHEATH перед ЕЈЕСТА, (*е*) – МС, (*ж*) – CIR, (*з*) – SHEATH перед МС.

скоростных потоков СВ. Часто встречающиеся в литературе показатели наклона ≈ -2.8 характерны, как правило, для высокоскоростных потоков и в областях ЕЈЕСТА, а максимальные на-

клоны спектров $-(2.9-3)$ характерны для областей SHEATH (перед ЕЈЕСТА и МС), МС и CIR. Эти цифры в целом согласуются со средними значениями наклонов, полученными выше на

всем диапазоне частот кинетического интервала спектра.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Формирование спектра флуктуации может определяться не только значениями параметров плазмы, но и типом крупномасштабных течений СВ [Riazantseva et al., 2017]. В данной работе проанализированы показатели наклонов спектров флуктуаций потока ионов как в МГД, так и в кинетическом масштабах внутри различных типов СВ. Показано, что показатели наклонов спектров внутри отдельных выделенных типов СВ могут существенно отличаться от средних показателей для СВ в целом. Показатели наклона спектра на МГД масштабах могут меняться в широких пределах, однако в среднем соответствуют классическому колмогоровскому спектру турбулентности. Для некоторых крупномасштабных течений СВ, таких как: медленный СВ, SHEATH перед EJECTA и MC характерные показатели наклона спектра значительно ниже по модулю показателей наклона колмогоровского спектра, что говорит об отсутствии развитого турбулентного каскада в таких течениях. Ранее в работе [Šafránková et al., 2016] было показано, что минимальные по модулю наклоны спектра флуктуаций плотности наблюдаются, как правило, в СВ с наименьшей амплитудой флуктуаций, что характерно для медленного невозмущенного СВ. Наклоны спектров, наблюдающиеся в областях быстрого СВ, EJECTA, SHEATH перед MC и CIR близки к колмогоровским.

На кинетических масштабах, как видно из таблицы, существует связь между средними показателями наклона спектра флуктуаций и величиной средних параметров СВ. Наименьшие по модулю показатели наклона на кинетическом масштабе наблюдаются в медленном СВ с минимальными значениями всех параметров СВ. При этом они наиболее близки к предсказаниям модели кинетической альвеновской турбулентности [Schekochihin et al., 2009]. Вклад затухания Ландау [Howes et al., 2008] в случае медленного СВ, по всей видимости, незначителен, тогда как для других областей его роль возрастает и в зависимости от условий в СВ приводит к различной степени укрупнения спектров флуктуаций. Максимальные по модулю показатели наклонов типичны для областей MC, SHEATH перед MC и CIR. При этом, следует отметить, что все три области отличаются повышенным значением модуля ММП, области CIR и SHEATH перед MC также отличаются повышенными значениями плотности протонов, а область MC отличается повышенным значением скорости и относительного содержания ионов гелия. Но следует отметить, что указанная тенденция видна лишь в среднем, и слабо проявляется в зависимости наклонов спектров от значений па-

раметров СВ на каждом рассмотренном интервале. Ранее в работе [Riazantseva et al., 2017] проводился анализ зависимости формы спектра флуктуаций от значений параметров СВ. Наиболее четко удалось выделить спектры флуктуаций с нелинейным укрупнением на кинетических масштабах, характеризующихся повышенными значениями плотности, скорости, температуры протонов, а также относительным содержанием ионов гелия, однако количество таких событий было сравнительно мало (~6%). С другой стороны, также было отмечено наличие достаточно большого количества интервалов с высокими значениями скорости и других параметров СВ, в которых не наблюдалось укрупнение спектров на кинетических масштабах. В связи с этим в данной работе, не делая разделения на формы спектров СВ в окрестности перехода от МГД к кинетическим масштабам, мы проанализировали наклоны спектров флуктуаций на кинетических масштабах, в двух диапазонах частот (3–5 Гц и 6–8 Гц). Сравнение наклонов в этих диапазонах частот позволяет четко выделить события с укрупнением спектров на более высоких частотах. Статистический анализ наклонов позволил выявить ярко выраженное укрупнение спектров на высоких частотах внутри MC и в областях SHEATH перед MC. Также наблюдается тенденция к укрупнению спектров внутри CIR, но в связи с широким разбросом показателей наклонов в распределении, эта группа событий требует более детального анализа. В интервалах, наблюдающихся внутри EJECTA и SHEATH перед EJECTA, проявляется слабая тенденция к укрупнению спектров. Для интервалов в спокойном низкоскоростном и высокоскоростном СВ, формирование которых происходит ближе к Солнцу, не характерно укрупнение спектров на высоких частотах. В работе [Howes et al., 2008] отмечалось, что линейное укрупнение спектра может наблюдаться в случаях, когда эффекты, связанные с затуханием Ландау, пренебрежимо малы и спектры соответствуют модели кинетической альвеновской турбулентности, тогда как экспоненциальное укрупнение спектра связано с возрастанием затухания. Нелинейное укрупнение экспериментально наблюдается только в тех случаях, где вклад затухания Ландау достаточно велик.

Отдельный интерес представляет исследование наклонов спектров на кинетических масштабах в быстрых течениях СВ. В работе Bruno et al. [2014] было показано, что для высокоскоростных потоков СВ ($V > 450$ км/с) типичны более высокие по модулю показатели наклона спектров флуктуаций, чем для низкоскоростных потоков. В работе Pitňa et al. [2016] исследовалось укрупнение спектров в областях вниз по потоку от межпланетных ударных волн, т.е. в областях, также обладающих в среднем повышенными значениями скорости СВ. Было предположено, что укруп-

чение спектра может быть связано с ускорением процессов диссипации на фронтах ударных волн. Представленные выше результаты подтверждают, что наклоны спектров в высокоскоростных потоках, действительно, в среднем несколько выше по модулю, чем в медленном СВ. Близкие показатели наклонов на кинетических масштабах также характерны для областей EJECTA. Однако самые высокие по модулю показатели наклонов спектров наблюдаются для интервалов внутри областей CIR, MC и SHEATH (перед MC и EJECTA), при этом повышенные средние скорости характерны только для MC, а для интервалов внутри CIR и SHEATH скорости в среднем ниже, чем скорости в высокоскоростных потоках СВ. Таким образом, можно заключить, что для формирования спектра флуктуаций на кинетических масштабах решающим является не само по себе значение скорости СВ (или какого либо другого параметра СВ), а принадлежность к тому или другому крупномасштабному типу СВ. Причем в областях MC и области компрессии плазмы перед ними создаются условия для формирования спектров с аномальным укрупнением на кинетических масштабах, что связано, с ускорением процессов диссипации в этих структурах. Можно предположить, что причиной возникновения таких условий является не сама по себе высокая величина скорости, а наличие областей взаимодействия разноскоростных потоков СВ, которые наиболее часто наблюдаются вблизи быстрых течений СВ разного происхождения: например, высокоскоростных течений из корональных дыр или быстрых выбросов корональных масс.

5. ВЫВОДЫ

В настоящем исследовании представлен статистический анализ спектральных характеристик флуктуаций потока ионов в СВ на основе данных прибора БМСВ, установленного на КА СПЕКТР-Р и позволяющего исследовать характеристики плазменной турбулентности на масштабах порядках ионного гирорадиуса и выше. Проанализирована зависимость наклонов спектров флуктуаций потока ионов, как на МГД так и на кинетических масштабах для различных крупномасштабных типов СВ и выявлено что на МГД масштабах:

- показатели наклонов спектров соответствуют наклону спектра $\sim -5/3$, характерному для модели развитой изотропной турбулентности Колмогорова только в областях высокоскоростных потоков из корональных дыр, областях EJECTA, а также областях сжатия плазмы перед высокоскоростными потоками (такими как CIR и SHEATH перед MC);

- для медленных потоков СВ, областей MC а также областей SHEATH перед EJECTA показатели наклона спектра, как правило заметно ниже

Колмогоровских наклонов, что характерно для процессов развития турбулентного каскада в этих случаях;

на кинетических масштабах:

- показатели наклона спектра флуктуаций близкие к предсказанному в модели кинетической альвеновской турбулентности наблюдаются только в медленном невозмущенном СВ, для которого значения всех плазменных параметров минимальны;

- показатели наклонов спектров флуктуаций потока ионов внутри областей быстрых потоков СВ и EJECTA в среднем соответствуют наклонам спектров флуктуаций магнитного поля, наблюдающимся в других экспериментах;

- максимальные показатели наклона спектров флуктуаций наблюдаются для областей MC, а также для областей компрессии плазмы SHEATH и CIR;

- аномальное нелинейное укрупнение спектров флуктуаций наблюдается, как правило, в областях MC и SHEATH перед MC, а также, в меньшей степени, в области CIR;

Более быстрый спад спектров флуктуаций наблюдающийся на высоких частотах по сравнению с предсказанным моделями, может быть связан с увеличением вклада затухания Ландау и ускорением процессов диссипации, в результате взаимодействия разноскоростных потоков СВ, характерных для вышеуказанных областей.

Авторы благодарят своих коллег по разработке прибора БМСВ в Карловом Университете (Прага, Чехия), а также коллег в ИКИ РАН, принимающих участие в управлении прибором, передаче и первичной обработке научной информации. Работа была сделана при поддержке Российского научного фонда, проект № 16-12-10062.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Застенкер Г.Н., Шафранкова Я., Немечек З. и др.* Быстрые измерения параметров солнечного ветра с помощью прибора БМСВ // Космич. исслед. Т. 51. № 2. С. 88–99. (Cosmic Research. P. 78–89). 2013. doi 10.1134/S0010952515010098
- *Зеленый Л.М., Милованов А.В.* Фрактальная топология и странная кинетика: от теории перколяции к проблемам космической электродинамики // УФН. Т. 174. № 8. С. 809–852. 2004 doi 10.1070/PU2004v047n08ABEH001705
- *Зеленый Л.М., Застенкер Г.Н., Петрукович А.А., Чесалин Л.С., Назаров В.Н., Прохоренко В.И., Ларионов Е.И.* Эксперимент ПЛАЗМА-Ф на спутнике “Спектр-Р” // Космич. исслед. Т. 51. № 2. С. 83–87. (Cos. Res. P. 73–79). 2013. doi 10.1134/S0010952513020093
- *Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю.*, Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 // Космич. исслед., Т. 47. № 2. С. 99–113 (Cosmic Research. P. 81–94). 2009. doi 10.1134/S0010952509020014

- Колмогоров А.Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // Докл. АН СССР. Т. 30. № 4. С. 299. 1941.
- Рязанцева М.О., Рахманова Л.С., Застенкер Г.Н., Ермолаев Ю.И. Типы спектров флуктуаций потока ионов в солнечном ветре и магнитослое на стыке инерционного и диссипативного интервалов // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 57. № 1. С. 3–9. 2017а. doi 10.1134/S001679321701011X
- Рязанцева М.О., Будаев В.П., Рахманова Л.С. и др. Переменяемость плотности солнечного ветра вблизи межпланетной ударной волны // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 57. № 6. С. 696–705. 2017б. doi 10.1134/S001679321706010X
- Alexandrova O., Chen C.H.K., Sorisso-Valvo L., Horbury T.S., Bale S.D. Solar wind turbulence and the role of ion instabilities // Space Sci. Rev. V. 178. P. 2–4. P. 101–139. 2013. doi 10.1007/s11214-013-0004-8
- Boldyrev S., Perez J.C., Spectrum of kinetic-Alfvén turbulence // Astrophys. J. V. 758. P. 44. 2012. doi 10.1088/2041-8205/758/2/L44
- Bruno R., Carbone V. The solar wind as a turbulence laboratory // Liv. Rev. Sol. Phys. V.10(2). 208 p. 2013. doi 10.12942/lrsp-2013-2
- Bruno R., Trenchi L., Telloni D. Spectral Slope Variation at Proton Scales from Fast to Slow Solar Wind // Astrophys. J. Lett. V. 793. № 1. L15. P. 5. 2014. doi 10.1088/2041-8205/793/1/L15
- Celnikier L.M., Muschietti L., Goldman M.V. Aspects of interplanetary plasma turbulence // Astron. Astrophys. V. 181. P. 138–154. 1987.
- Chandran B.D.G., Quataert E., Howes G.G., Xia Q., Pongkitivanichakul P. Constraining low-frequency Alfvénic turbulence in the solar wind using density-fluctuation measurements // The Astrophys. J. V. 707(2). P. 1668–1675. 2009. doi 10.1088/0004-637X/707/2/1668
- Chen C.H.K., Salem C.S., Bonnel, J.W., Mozer F.S., Bale S.D. Density fluctuation spectrum on solar wind turbulence between ion and electron scales // Phys. Rev. Lett. V. 109. 035001. 2012. doi 10.1103/PhysRevLett.109.035001
- Chen C.H.K., Leung L., Boldyrev S., Maruca B.A., Bale S.D. Ion-scale spectral break of solar wind turbulence at high and low beta // Geophys. Res. Lett. V. 41. № 22. P. 8081–8088. 2014а. doi 10.1002/2014GL062009
- Chen C.H.K., Sorisso-Valvo L., Šafránková J., Němeček Z. Intermittency of solar wind density fluctuations from ion to electron scales // Astrophys. J. Lett. V. 789(L8). P. 5. 2014б. doi 10.1088/2041-8205/789/1/L8
- Frisch U. Turbulence. Cambridge University Press. 312 p. 1995.
- Howes G.G., Cowley S.C., Dorland W., Hammett G.W., Quataert E., Schekochihin A.A. A model of turbulence in magnetized plasmas: implications for the dissipation range in the solar wind // J. Geophys. Res. V. 113. № A12. P. 5103. 2008. doi 10.1029/2007JA012665
- Kellogg P.J., Horbury T.S. Rapid density fluctuations in the solar wind // Ann. Geophys. V. 23. № 12. P. 3765–3773. 2005. doi 10.5194/angeo-23-3765-2005
- Lepping R.P., Acuna M.H., Burlaga L.F. et al. The WIND magnetic field investigation // Space Sci. Rev. V. 71. P. 207. 1995. doi 10.1007/BF00751330
- Lion S., Alexandrova O., Zaslavsky A. Coherent events and spectral shape at ion kinetic scales in the fast solar wind turbulence // Astrophys. J. V. 824(1). P. 47. 2016. doi 10.3847/0004-637X/824/1/47
- Pitňa A., Šafránková J., Němeček Z., Goncharov O., Němec F., Přeč L., Chen C.H.K., Zastenker G.N. Density fluctuations upstream and downstream of interplanetary shocks // Astrophys. J. V. 819. 41. 2016. doi 10.3847/0004-637X/819/1/41
- Riazantseva M.O., Budaev V.P., Rakhmanova L.S., Zastenker G.N., Šafránková J., Němeček Z., Přeč L. Variety of shapes of solar wind ion flux spectra: Spektr-R measurements // Journal of Plasma Physics. V. 83. № 4. 705830401. 2017. doi 10.1017/S0022377817000502
- Šafránková J., Němeček Z., Přeč L., Zastenker G. et al. Fast solar wind monitor (BMSW): description and first results // Space Sci. Rev. V. 175(1–4). P.165–182. 2013. doi 10.1007/s11214-013-9979-4
- Šafránková J., Němeček Z., Němec F., Přeč L., Pitňa A., Chen C.H.K., Zastenker G.N. Solar wind density spectra around the ion spectral break // Astrophys. J. V. 803. P. 107(7 pp.). 2015. doi 10.1088/0004-637X/803/2/107
- Šafránková J., Němeček Z., Němec F., Přeč L., Chen C.H.K., Zastenker G.N. Power spectral density of fluctuations of bulk and thermal speeds in the solar wind // Astrophys. J. V. 825. P. 121(8 pp.). 2016. doi 10.3847/0004-637X/825/2/121
- Schekochihin A.A., Cowley S.C., Dorland W., Hammett G.W., Howes G.G., Quataert E., Tatsuno T. Astrophysical gyrokinetics: kinetic and fluid turbulent cascades in magnetized weakly collisional plasmas // Astrophysical Journal Supplement Series. V. 182. P. 310–377. 2009.
- Servidio S., Valentini F., Perrone D., Greco A., Califano F., Matthaeus W.H., Veltri P. A kinetic model of plasma turbulence // J. Plasma Physics. V. 81. 325810107. 2015. doi 10.1017/S0022377814000841
- Unti T.W.J., Neugebauer M., Goldstein B.E. Direct measurements of solar-wind fluctuations between 0.0048 and 13.3 Hz // Astrophys. J. V. 180. P. 591–598. 1973. doi 10.1086/151987