

УДК 523.62-726

РОЛЬ СРЕДНЕМАСШТАБНЫХ СТРУКТУР СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В РАЗВИТИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ЗА ГОЛОВНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

© 2025 г. Л. С. Рахманова^{1, *}, М. О. Рязанцева^{1, **}, А. А. Хохлачев^{1, ***},
Ю. И. Ермолаев^{1, ****}, Г. Н. Застенкер^{1, *****}

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

*e-mail: rakhnud@gmail.com

**e-mail: oream@gmail.com

***e-mail: aleks.xaa@yandex.ru

****e-mail: yermol@iki.rssi.ru

*****e-mail: gzastenk@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 08.03.2024 г.

После доработки 16.05.2024 г.

Принята к публикации 25.07.2024 г.

В данной работе проводится оценка вклада среднemasштабных структур – вариаций, регистрируемых спутником за временной период порядка 10 минут, – в развитие турбулентности в переходной области за околоземной ударной волной. Исследование основано на одновременных измерениях параметров плазмы и/или магнитного поля в солнечном ветре, в дневном магнитослое и на флангах. Используются данные спутников Wind, THEMIS, Спектр-Р. Анализируются характеристики спектров флуктуаций модуля магнитного поля и потока ионов в частотном диапазоне 0.01–4 Гц, на котором наблюдается переход от МГД к кинетическим масштабам. Показано, что динамика характеристик турбулентности в переходной области определяется крупномасштабными возмущениями, в то время как при их отсутствии на формирование турбулентного каскада могут оказывать влияние структуры меньших масштабов.

Ключевые слова: солнечный ветер, магнитослой, плазма, турбулентность, космическая погода

DOI: 10.31857/S0016794025010049, EDN: AENWMU

1. ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие солнечного ветра (СВ) и магнитосферы Земли является комплексным процессом, важную роль в котором играет переходная область за околоземной ударной волной (ОЗУВ) – магнитослой (МСЛ). Модели отклика магнитосферы на межпланетные возмущения используют в качестве входных параметров измерения в СВ, однако перед магнитопаузой свойства плазмы и магнитного поля, включая характеристики их вариаций, могут сильно отличаться от невозмущенного СВ. Как показывает ряд исследований, в МСЛ происходит модификация плазменных и магнитных структур, пришедших из СВ [Rakhmanova et al., 2016; Turc et al., 2017]. В частности, непосредственно перед магнитопаузой одни из наиболее геоэффективных параметров – знак и модуль B_z -компоненты маг-

нитного поля – могут отличаться от наблюдаемых в СВ [Turc et al., 2017; Пулинец и др., 2014; Šafránková et al., 2009].

Хорошо известно, что крупномасштабные возмущения в солнечном ветре, такие как корональные выбросы массы (ICME) и области сжатия перед высокоскоростными потоками из корональных дыр (CIR) являются наиболее геоэффективными событиями [Yermolaev et al., 2012]. Усиленное влияние на магнитосферу, как правило, обусловлено наличием в таких структурах длительных периодов южной ориентации межпланетного магнитного поля ($B_z < 0$), а также с увеличением динамического давления или величины потока энергии (вектора Пойнтинга) в таких событиях [Yermolaev et al., 2012]. Однако детальный анализ показывает, что может иметь значение и внутренняя структура крупномас-

штабных возмущений СВ. Например, перед ICME может присутствовать область сжатия, перед которой может находиться ударная волна, и такие ICME обладают различной геоэффективностью [Yermolaev et al., 2012]. Внутри области сжатия также формируются различные разрывы, каждый из которых может вызывать отклик магнитосферы [Blum et al., 2021]. Разнообразные возмущения в СВ сопровождаются особенностями в процессах за ОЗУВ, в частности, взаимодействие области сжатия с магнитосферой характеризуется повышенной генерацией джетов (структур с размерами порядка земного радиуса, характеризующихся резким возрастанием плотности плазмы) в МСЛ [LaMoury et al., 2020], которые оказывают дополнительное воздействие на магнитопаузу [Dmitriev et al., 2021]. Внутренняя структура ICME также имеет свою динамику, и пересечение ОЗУВ оказывает влияние на эту динамику. Как показано в работе [Turc et al., 2017], при пересечении ОЗУВ внутри магнитных облаков знак B_z -компоненты магнитного поля может изменяться на противоположный на временных интервалах порядка 30 мин. Таким образом, геоэффективность крупномасштабных возмущений солнечного ветра (имеющих пространственные масштабы порядка 10^7 км) может определяться и вложенными в них структурами меньших масштабов (вариациями с масштабами порядка 10^5 км, регистрируемыми за время порядка единиц-десятков минут, далее по тексту — структуры средних масштабов), а также их модификацией в МСЛ. Такими структурами в СВ, как правило, являются разрывы различного типа [Tsurutani et al., 2010]. В рамках анализа солнечно-земных связей важно иметь представление, каким образом структуры различных масштабов могут изменяться в МСЛ и какие факторы влияют на этот процесс.

Существует несколько подходов к исследованию процессов, протекающих в МСЛ на различных масштабах, например, анализ отдельных структур [Rakhmanova et al., 2016; Рахманова и др., 2018; Turc et al., 2017], анализ усредненных значений вариаций параметров [Nemesek et al., 2000; Shevurev et al., 2003], анализ вклада различных волновых мод [Anderson et al., 1996; Breuillard et al., 2016]. Одним из подходов является анализ спектра турбулентных флуктуаций параметров плазмы и магнитного поля и зависимости его характеристик от внешних факторов. Такой подход позволяет рассматривать совокупность процессов в определенном диапазоне масштабов, а также взаимодействие структур различных масштабов между собой. Спектры дают представление

о процессах, ответственных за перекачку энергии в турбулентном каскаде. Наиболее разносторонне на данный момент исследованы характеристики турбулентности в СВ [Bruno and Carbone, 2013; Alexandrova et al., 2013]. Считается, что на масштабах более 10^6 км происходит поступление энергии в систему за счет крупномасштабных структур, возникающих в солнечной короне, энергия передается на меньшие масштабы посредством нелинейных взаимодействий турбулентных вихрей, формируя инерционную область каскада, и на масштабах порядка гирорадиуса протона ($\sim 10^3$ км) начинается диссипация энергии и происходит нагрев плазмы. Экспериментальные исследования показывают, что на масштабах поступления энергии спектр флуктуаций магнитного поля характеризуется степенной функцией f^1 [Bruno et al., 2009], при переходе к инерционной области каскада (т.н. МГД-масштабы) спектр описывается степенной функцией $f^{5/3}$ (соответствующей классическому Колмогоровскому спектру) [Bruno et al., 2009; Smith et al., 2006] и на субионных (кинетических) масштабах происходит переход к диссипационной области, в которой показатель степени лежит в диапазоне от -2 до -4 [Alexandrova et al., 2012; Smith et al., 2006]. Показатель степени при этом определяется протекающими в плазме процессами диссипации, например, затуханием Ландау, перемежаемостью, а также присутствием плазменных и магнитных структур, таких как тонкие токовые слои или Альвеновские вихри. Кроме того, на характеристики спектров на кинетических масштабах оказывают влияние волновые процессы [Breuillard et al., 2016].

Турбулентность плазмы и магнитного поля в МСЛ изучена в меньшей степени, чем в СВ, в связи с существенно более сложной динамикой процессов в этой области. По сравнению со спокойным СВ, в МСЛ турбулентность постоянно развивается в присутствии границ — ОЗУВ и магнитопаузы. Кроме того, на процессы внутри МСЛ, в т.ч. формирование турбулентного каскада, оказывает существенное влияние направление межпланетного магнитного поля относительно ОЗУВ: при угле $\theta_{BN} < 45^\circ$ между вектором межпланетного магнитного поля и локальной нормалью к ОЗУВ (квази параллельная ОЗУВ) в МСЛ существенно возрастает мощность флуктуаций [Shevurev et al., 2005], в то время как при $\theta_{BN} > 45^\circ$ (квази перпендикулярная ОЗУВ) мощность флуктуаций в МСЛ значительно меньше (порядка 10% от величины параметра), однако наблюдается существенная анизотропия температуры, приводящая к генерации волновых процессов [Schwartz et al., 1996]. Как показывают

экспериментальные исследования, за ОЗУВ спектр флуктуаций на МГД-масштабах существенно отличается от Колмогоровского вида [Czaykowska et al., 2001; Huang et al., 2017]. Предполагается, что на ОЗУВ происходит смешивание фаз флуктуаций, и в результате в дневном МСЛ не наблюдается инерционной области каскада, а в процессе распространения плазмы к флангам происходит развитие турбулентного каскада и формирование классического Колмогоровского спектра [Huang et al., 2017]. Однако, ряд исследований показывает, что такое изменение наблюдается не всегда [Рахманова и др., 2019] и зависит от параметров набегающего потока СВ [Rakhmanova et al., 2020, 2022]. В частности, показано, что в периоды спокойного течения СВ спектры флуктуаций в МСЛ близки к наблюдаемым в СВ, тогда как в периоды крупномасштабных возмущений в межпланетной среде (ICME, CIR) на ОЗУВ происходит сильное изменение характеристик турбулентности, в том числе отсутствие Колмогоровского скейлинга на МГД-масштабах и укрупнение спектров на кинетических масштабах.

На данный момент существует представление о свойствах турбулентности в различных областях МСЛ [Huang et al., 2017; Rakhmanova et al., 2018; Рахманова и др., 2018; Li et al., 2020], полученные на основе статистического анализа измерений за ОЗУВ. Кроме того, существуют экспериментальные указания на особенности формирования турбулентности за ОЗУВ для различных крупномасштабных типов СВ [Рахманова и др., 2018; Rakhmanova et al., 2022]. Однако, как показано выше, внутри крупномасштабных межпланетных возмущений всегда присутствуют структуры средних масштабов, которые подвержены изменениям на ОЗУВ. Под структурами в данном случае понимаются быстрые изменения параметров магнитного поля (поворот) или плазмы или их вариации. Резкие повороты магнитного поля, сопровождаемые изменениями плазменных параметров, как известно, характерны для таких явлений в СВ, как тангенциальный и вращательный разрывы [Tsurutani et al., 2010]. Влияние таких структур на динамику турбулентного каскада в МСЛ до сих пор не исследовалось, несмотря на упоминаемый в литературе вклад в солнечно-земные связи [Blum et al., 2021].

В настоящей работе на основе нескольких событий анализируется, как структуры средних масштабов могут влиять на процесс модификации турбулентного каскада на ОЗУВ. Рассмотрены события, когда доступны измерения на трех спутниках – в СВ, в дневном МСЛ и на фланге МСЛ. Используются данные спутников Wind,

THEMIS, Спектр-Р. Для того, чтобы оценить разницу между спокойными и возмущенными условиями в СВ, выделяются периоды медленного невозмущенного СВ и ICME, включая области сжатия перед ними. Анализируются характеристики Фурье-спектров флуктуаций модуля магнитного поля и потока ионов в частотном диапазоне 0.01–4 Гц.

2. ДАННЫЕ

В данной работе использовались одновременные измерения на трех спутниках, находящихся в разных областях околоземного пространства, с учетом времени распространения плазмы между спутниками. В СВ использовались данные спутника Wind: характеристики плазмы измерялись с помощью прибора SWE [Ogilvie et al., 1995] с разрешением 92 с или прибора 3DP [Lin et al., 1995] с разрешением 3 с, модуль и компоненты магнитного поля измерялись прибором MFI [Lepping et al., 1995] с временным разрешением 0.092 с. В МСЛ использовались измерения одного из спутников миссии THEMIS, параметры плазмы измерялись прибором ESA [Auster et al., 2008] с разрешением 3–4 с, характеристики магнитного поля измерялись с помощью прибора FGM [McFadden et al., 2008] с разрешением 0.25 с.

Следует отметить, что в случае спутников Wind и THEMIS ключевыми в настоящем анализе являлись измерения магнитного поля с высоким временным разрешением, тогда как плазменные параметры использовались как вспомогательные, в частности, для трассирования плазмы между спутниками.

Кроме того, в МСЛ использовались данные прибора БМСВ [Застенкер и др., 2013; Šafránková et al., 2009] на спутнике Спектр-Р. Были использованы измерения плотности, скорости и температуры плазмы с временным разрешением 3 с и измерения потока ионов с разрешением 0.031 с.

Были отобраны три интервала времени, относящихся к различным дням: 1) спокойный СВ, 2) область сжатия перед ICME, 3) ICME вместе с областью сжатия перед ним. Основным критерием для отбора событий являлось одновременное наличие измерений с максимально доступным временным разрешением на всех трех спутниках, а также длительность интервала не менее 2 ч. При этом рассматривались события, когда на трех спутниках наблюдались схожие временные ряды изменений плотности, что гарантирует рассмотрение одной и той же плазмы в трех точках. Все отобранные события относились к МСЛ за квази перпендикулярной ОЗУВ.

На рис. 1*а* представлены измерения потока ионов на спутниках Wind (СВ, темно-серая линия), Спектр-Р (дневной МСЛ, светло-серая линия) и THEMIS-C (фланг, черная линия). Расположение спутников в околоземном пространстве приведено на панели (*з*), ОЗУВ и магнитопауза показаны схематично.

Основной проблемой при анализе многоспутниковых измерений является определение времени распространения плазмы между космическими аппаратами. В данной работе на первом этапе сдвиг вычислялся как расстояние между спутниками, деленное на скорость плазмы СВ. Далее вручную определялись структуры плазмы и\или магнитного поля, которые видны на всех спутниках, и временные ряды данных сдвигались таким образом, чтобы структуры совпадали. Для примера, представленного на рис. 1, временной сдвиг между Wind и Спектр-Р составил 3590 с, между Спектр-Р и THEMIS-C – 1545 с. На рис. 1*а* ряд

структур хорошо прослеживается на всех трех спутниках (например, возрастания плотности в ~17:50 UT, ~18:10 UT).

На рис. 1 панели *б*, в приведены измерения магнитного поля на THEMIS-C и Wind, соответственно, сдвинутые на то же время, что и временные ряды плотности плазмы. Измерения магнитного поля на спутнике Спектр-Р отсутствуют. Хорошо видно, что одни и те же структуры магнитного поля (напр., в ~17:50 UT, ~18:45 UT) наблюдаются на паре спутников, несмотря на значительное расстояние между ними. Более подробное описание, особенности и проблемы сопоставления данных с нескольких спутников в СВ и МСЛ приведены в работе [Rakhamnova et al., 2022].

Для анализа влияния структур средних масштабов на характеристики турбулентности из отобранных временных рядов выбирались интервалы, в течение которых указанные структуры

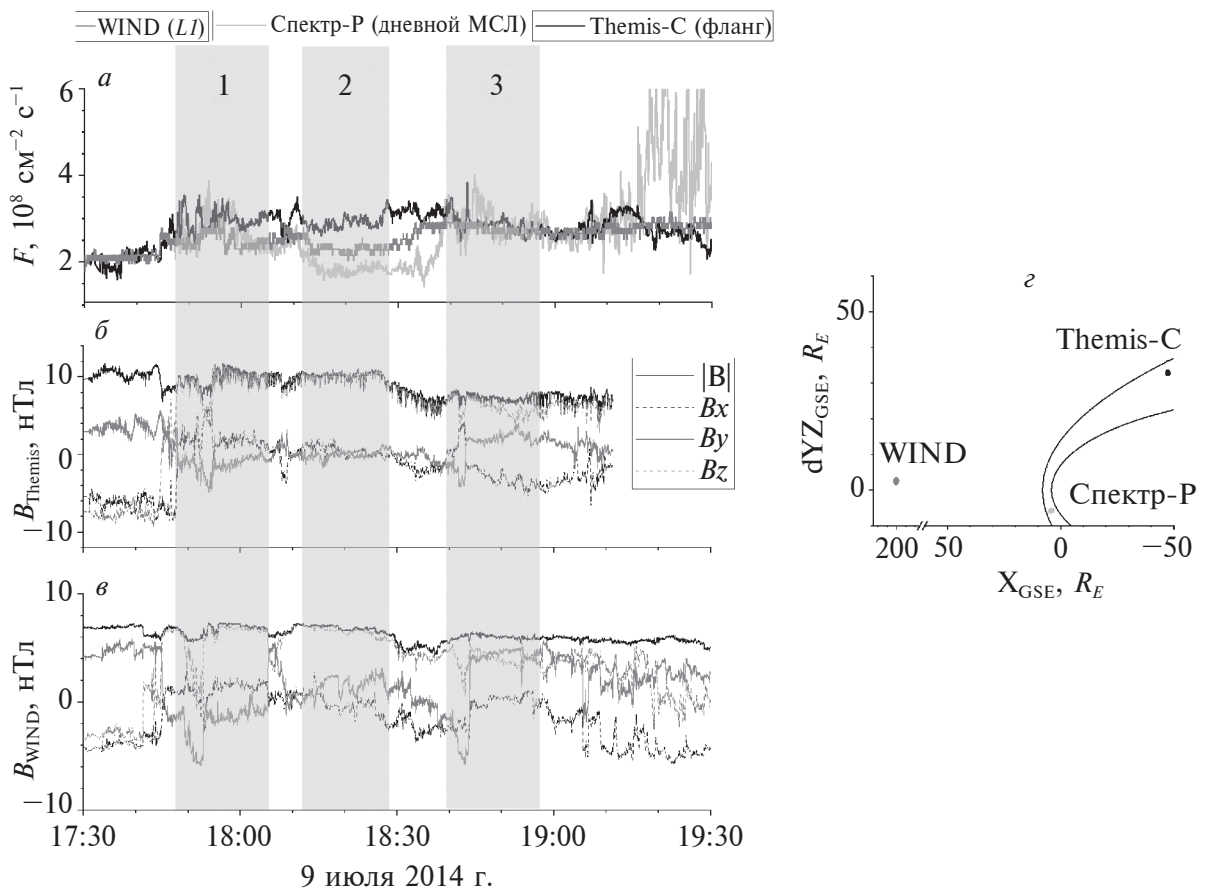


Рис. 1. (*а*) – Поток ионов в СВ (темно-серая линия), в дневном МСЛ (светло-серая линия) и на фланге (черная линия) для события 9 июля 2014 г.; (*б*, *в*) – измерения модуля и компонент магнитного поля на спутниках THEMIS и Wind, соответственно, данные всех спутников сдвинуты на время распространения плазмы; (*з*) – расположение спутников для рассматриваемого события.

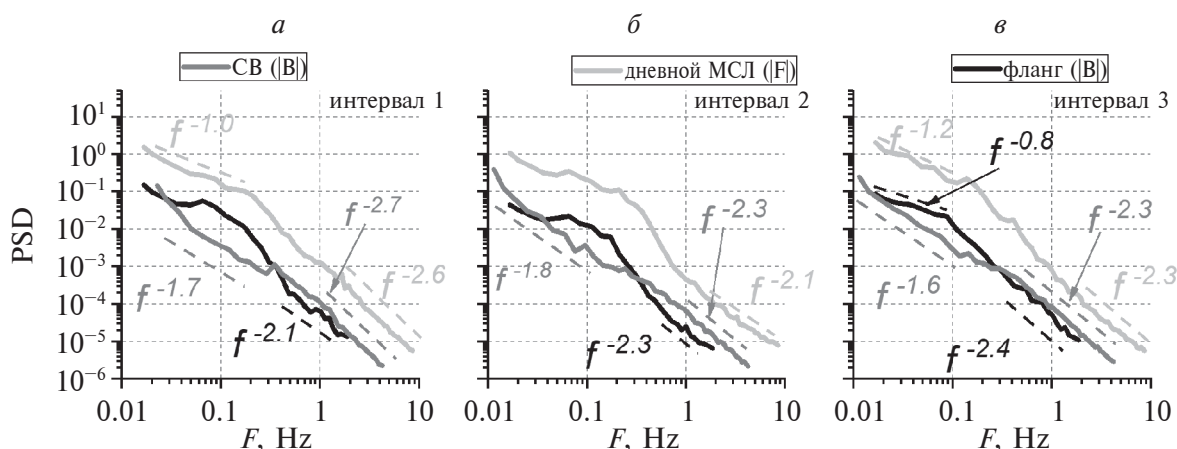


Рис. 2. Сравнение нормированных спектров флуктуаций модуля магнитного поля ($|B|$) и потока ионов ($|F|$) в трех областях околоземного пространства – в СВ (темно-серая линия), в дневной МСЛ (светло-серая линия) и на флангах (черная линия) – для трех интервалов, отмеченных на рис. 1.

регистрировались на всех трех спутниках, а также квази стационарные интервалы, на которых структуры не наблюдались. На рис. 1а–в выделены три отобранных интервала. Длительность интервалов выбиралась таким образом, чтобы обеспечить достаточное количество точек для Фурье-анализа, и составляет ~ 17 мин для данных Спектр-Р и THEMIS и 25 мин для данных Wind. Различие в длительности интервалов обусловлено разным временным разрешением анализируемых данных; при этом середины интервалов данных Wind и THEMIS-C/Спектр-Р совпадают. В течение интервалов 1 и 3 наблюдаются повороты поля (резкое изменение одной из компонент) и изменения плотности плазмы. В течение интервала 2 плазма и магнитное поле на всех трех спутниках квази стационарны.

Следует отметить, что в рамках данной работы в качестве структур средних масштабов рассматриваются структуры с изменениями плотности плазмы, сопровождаемые поворотом магнитного поля. Анализ типа этих структур не проводится.

Для отбираемых представленных образом интервалов вычислялись Фурье-спектры флуктуаций модуля магнитного поля (по данным Wind и THEMIS) и потока ионов (по данным Спектр-Р). Вариации обоих параметров представляют собой вариации сжатия, и их спектры имеют, как правило, одинаковый скейлинг [Chen, 2016; Chen and Boldyrev, 2017; Breuillard et al., 2018]. Для сравнения разных параметров между собой спектры флуктуаций магнитного поля и потока ионов были нормированы на среднее значение параметра за интервал.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Пример, представленный на рис. 1, относится к периоду медленного невозмущенного СВ (тип *Slow* по каталогу [Ермолаев и др., 2009]). На рис. 2а–в показаны спектры для трех отобранных интервалов, на каждой панели представлены три спектра – в СВ (темно-серая линия, флуктуации модуля магнитного поля $|B|$), в дневной части МСЛ (светло-серая линия, флуктуации потока ионов $|F|$) и на фланге МСЛ (черная линия, флуктуации модуля магнитного поля $|B|$). Штриховыми линиями представлены результаты аппроксимации спектров степенными функциями. В данной работе Фурье-спектры вычисляются по разным параметрам – модуль магнитного поля и поток ионов – в связи с отсутствием на спутнике Спектр-Р измерений магнитного поля. Флуктуации потока ионов представляют собой флуктуации плотности, поскольку величина скорости плазмы варьируется в меньшей степени (непосредственное сравнение спектров флуктуаций потока ионов и плотности плазмы проводилось в работе [Pitňa et al., 2016]). Флуктуации плотности плазмы и модуля магнитного поля представляют собой компрессионную компоненту турбулентного каскада и как правило имеют близкие характеристики. Кроме того, одинаковый скейлинг модуля магнитного поля и плотности был показан по одновременным измерениям на одном спутнике как для МГД [напр., Chen 2016], так и на кинетических масштабах [Chen and Boldyrev, 2017; Breuillard et al., 2018]. Поэтому в настоящей работе полагается, что сравнение свойств спектров флуктуаций указанных величин оправдан, если рассматривается только скейлинг флуктуаций, а не их мощность.

Интервал 1 характеризуется спектром $\sim f^{1.7\pm 0.2}$ в СВ на МГД-масштабах и $f^{2.7\pm 0.1}$ на кинетических масштабах. На МГД-масштабах спектр близок к Колмогоровскому виду, характерному для плазмы СВ. На кинетических масштабах наклон спектра также соответствует средним для СВ значениям и близок к значению $-8/3$, предсказываемому некоторыми теориями [Boldyrev and Perez, 2012]. За ОЗУВ наблюдается существенное уплощение спектра на МГД-масштабах, наклон спектра составляет -1 ± 0.3 , что характерно для турбулентности дневной части магнитослоя [Czaykowska et al., 2001; Huang et al., 2017]. На кинетических масштабах при этом спектр имеет наклон -2.6 ± 0.1 , близкий к $-8/3$ и к наблюдаемому в СВ. На флангах невозможно определить наклон спектра на МГД-масштабах из-за наличия пика на переходных масштабах, вызванного волновыми процессами. При этом на кинетических масштабах спектр имеет наклон -2.1 ± 0.3 , т.е. спектр более плоский, чем в СВ и в дневном МСЛ. Таким образом, в данном событии на ОЗУВ произошло ожидаемое в этой области существенное изменение скейлинга турбулентного каскада на МГД-масштабах и сохранение на кинетических, а при распространении к флангам произошло уплощение кинетической части спектра, которое может быть обусловлено усилением флуктуаций сжатия.

Аналогично проводилось сравнение характеристик турбулентности для других интервалов. Как видно из рис. 2б, для интервала 2, на котором отсутствуют среднемасштабные структуры, в СВ наблюдается наклон -1.8 ± 0.2 на МГД-масштабах, что близко к Колмогоровскому скейлингу, а наклон на кинетических масштабах составляет -2.3 ± 0.1 , что близко к $-7/3$, также часто предсказываемому в теориях [Schekochihin et al., 2009]. В дневном МСЛ усиление волновой активности приводит к появлению широкого пика в спектре на частотах 0.05–0.8 Гц, что делает невозможным определение наклона на МГД-масштабах. В области частот после излома наклон спектра составляет -2.1 ± 0.1 , что наблюдается достаточно редко как в МСЛ, так и в СВ. Таким образом, за ОЗУВ наблюдается незначительное уплощение спектра на кинетических масштабах. При распространении к флангам пик в спектре сохраняется, что свидетельствует о локальности волнового процесса, ответственного за него. На кинетических масштабах наблюдается восстановление наклона спектра -2.3 ± 0.2 , близкого к наблюдаемому в СВ.

Для интервала 3, в течение которого регистрируются среднемасштабные структуры, в СВ наблюдается наклон -1.6 ± 0.1 на МГД-масштабах, т.е. Колмогоровский спектр, и -2.3 ± 0.1 на кинетических.

В дневном МСЛ на МГД-масштабах происходит уплощение спектра до $f^{1.2\pm 0.3}$, в то время как на кинетических масштабах спектр не изменяется и имеет наклон -2.3 ± 0.1 . На флангах МСЛ на МГД-масштабах спектр характеризуется наклоном -0.8 ± 0.1 , т.е. также отличается от Колмогоровского. На кинетических масштабах наклон спектра составляет -2.4 ± 0.1 , что близко к наблюдениям в СВ и в дневном МСЛ.

Таким образом, при спокойных условиях в СВ при отсутствии среднемасштабных структур (интервал 2) в дневном МСЛ основной вклад в спектры турбулентных флуктуаций на МГД-масштабах вносят волновые процессы, что приводит к доминированию пика в спектре на частотах, близких к излому. На кинетических масштабах спектры незначительно уплощаются за ОЗУВ до показателей степени, которые наблюдаются по статистике достаточно редко. При распространении к флангам пик в спектре сохраняется, что подразумевает, что источник волнового процесса перемещается к флангам вместе с плазмой. На кинетических масштабах наблюдается восстановление скейлинга, характерного для СВ. Следует отметить, что как правило в МСЛ наблюдаются либо ионно-циклотронные альвеновские неустойчивости, либо волны зеркальной моды, которые являются вариациями сжатия. Можно предположить, что общий низкий уровень флуктуаций приводит к тому, что после пересечения ОЗУВ основной вклад в развитие турбулентного каскада дает компрессионная зеркальная мода.

В присутствии структур средних масштабов (интервалы 1, 3) на МГД-масштабах за ОЗУВ пропадает Колмогоровский скейлинг, характерный для турбулентности в СВ, что в среднем характерно для дневного МСЛ [Huang et al., 2017]. При этом на кинетических масштабах наклон спектра сохраняется в дневном МСЛ. Однако при распространении к флангам не наблюдается восстановления Колмогоровского скейлинга, которое, как правило, происходит при удалении плазмы от подсолнечной области МСЛ [Rakhmanova et al., 2022]. Кроме того, на кинетических масштабах может наблюдаться уплощение спектров. Стоит отметить, что в этом случае на частотах излома спектра также присутствовал пик компрессионных флуктуаций.

На рис. 3 (по аналогии с рис. 1) представлено событие, относящееся к области сжатия *Sheath* перед ICME. В самой области ICME необходимые измерения отсутствовали. В дневной части МСЛ находился спутник THEMIS-E (до 00:10 UT) и спутник THEMIS-A (после 00:10 UT). В ходе события можно выделить 4 интервала: в интерва-

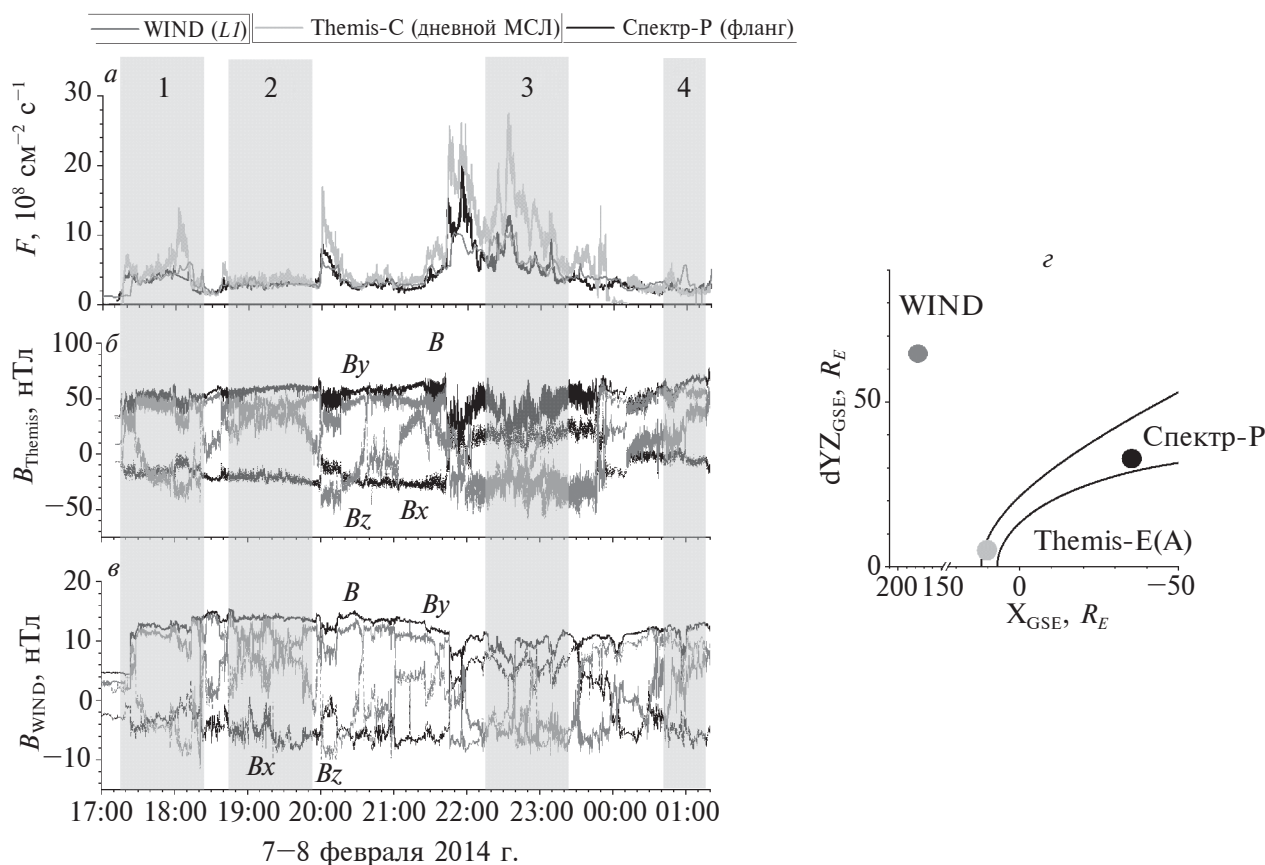


Рис. 3. Аналогично рис. 1 для события 7–8 февраля 2014 г., относящегося к области сжатия *Sheath*.

лах 1 и 3 как в СВ, так и в МСЛ наблюдаются существенные вариации плотности и повороты магнитного поля (сопровожденные изменением знака B_z -компоненты), в интервалах 2 и 4, несмотря на наличие вариаций всех компонент магнитного поля, характерное для СВ такого типа, не наблюдается изменение знака B_z , а также отсутствуют существенные вариации плотности плазмы. В данном событии интервалы 1 и 3 рассматривались, как интервалы со среднемасштабными структурами, события 2 и 4 – как квазистационарные интервалы без структур.

Аналогично, на рис. 4 представлено событие 16 февраля 2014 г., в котором возможно провести анализ как для области *Sheath*, так и для ICME (магнитного облака, МС), перед которым эта область сформировалась. Интервалы 1 и 3 характеризуются отсутствием структур, интервалы 2 и 4 содержат среднемасштабные структуры. Как видно из рис. 4, временной сдвиг, обеспечивающий совпадение структур в области *Sheath*, приводит к расхождению магнитных структур в области МС (в 05:00–05:30 UT). Это происходит из-за различия в скорости распространения раз-

личных структур СВ. В данном случае для каждого из рассмотренных интервалов сдвиг между временными рядами данных уточнялся отдельно.

Аппроксимация полученных спектров проводилась аналогично случаю спокойного СВ. Характеристики спектров для всех рассмотренных интервалов приведены в табл. 1.

В табл. 1 указаны порядковый номер интервала, дата события, тип СВ и номер интервала на рисунке, наличие среднемасштабных структур внутри интервала, а также приведены значения наклонов спектров в трех областях околоземного пространства как на МГД, так и на кинетических масштабах. В ряде случаев определение наклона на МГД-масштабах невозможно из-за волновых процессов.

Как показывает сравнение наклонов спектров в разных локациях для возмущенного СВ, на МГД-масштабах, как правило, наблюдается сильная волновая активность в дневном МСЛ, мешающая определению скейлинга. Однако, для интервалов 4–7 характерно как сохранение скейлинга на МГД-масштабах при пересечении ОЗУВ,

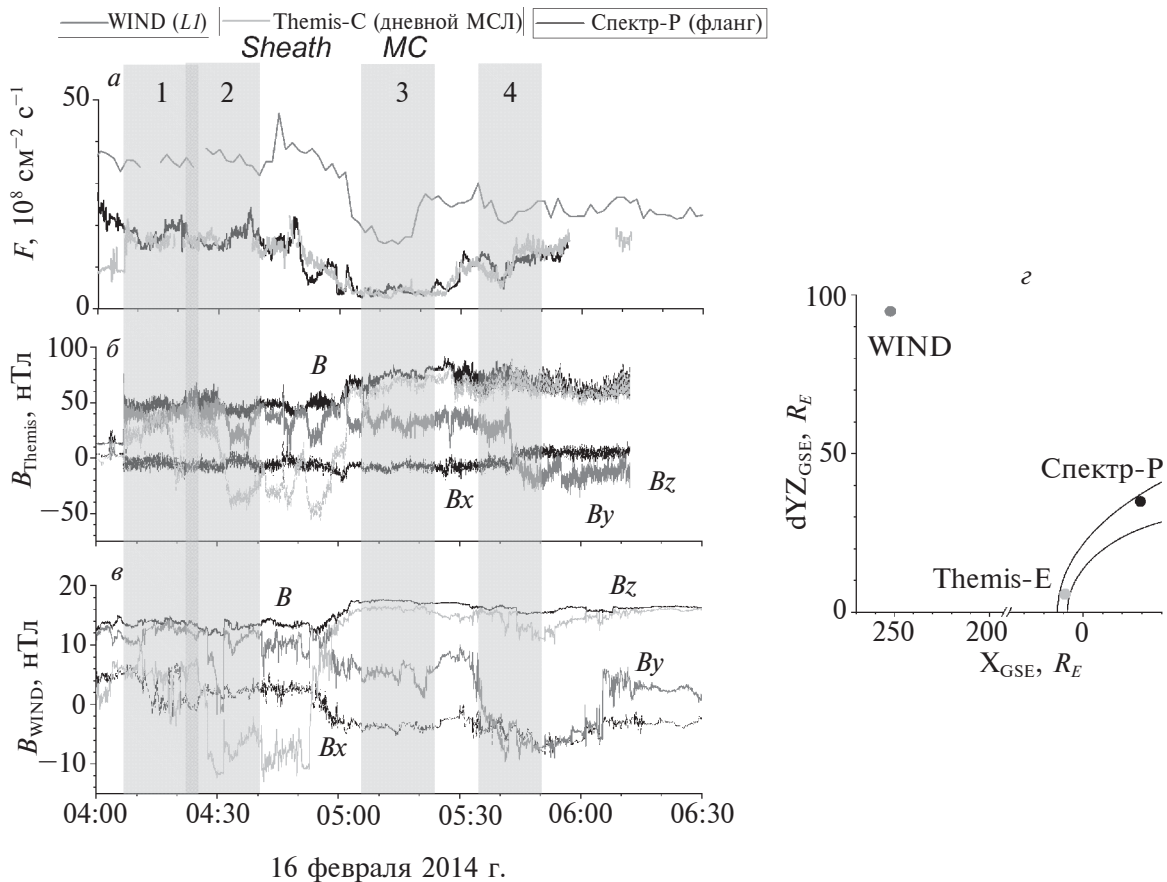


Рис. 4. Аналогично рис. 1 для события 16 февраля 2014 г., относящегося к ICME с областью сжатия *Sheath* перед ним.

так и существенное уплощение спектров, причем уплощение может наблюдаться как на фоне среднемасштабных структур, так и без них. Причем спектры за ОЗУВ характеризуются более существенным уплощением, чем для спокойного СВ. Аналогичные изменения на ОЗУВ были отмечены ранее для возмущенного СВ [Rakhmanova et al., 2022] и являются характерным изменением свойств турбулентности на ОЗУВ.

Для большинства событий на флангах наблюдаются Колмогоровские спектры на МГД-масштабах, что характерно для этой области. Для событий 8 и 11, однако, спектры остаются более плоскими, чем в СВ. Эти события наблюдаются как на фоне квази стационарного СВ, так и в присутствии среднемасштабных структур, т.е. указанные структуры не оказывают влияние на данный процесс.

На кинетических масштабах для большинства событий (кроме 6, 7) наблюдается укрупнение спектров за ОЗУВ вне зависимости от присутствия структур средних масштабов. При этом наиболее крутые спектры в дневном МСЛ (с наклонами до -4.8) наблюдаются в периоды самого

ICME, что хорошо согласуется с прошлыми результатами [Rakhmanova et al., 2022]. Для событий 6 и 7, наблюдаемых в периоды взаимодействия с МСЛ областей сжатия *Sheath*, наблюдаются нетипично крутые спектры в СВ и их уплощение в дневном МСЛ. Интересно, что интервалы 6 и 7 характеризуются наличием и отсутствием структур средних масштабов, соответственно. То есть процессы, ответственные за изменение спектра на ОЗУВ, и в данном случае не связаны с среднемасштабными структурами.

На флангах МСЛ на кинетических масштабах, как правило, формируются спектры с наклонами $-(2.6-3.2)$, характерные для турбулентности МСЛ. При этом не наблюдается связи между значениями наклонов в СВ и на фланге и присутствием среднемасштабных структур. Однако, особенности в спектрах наблюдаются в рассмотренных выше событиях 6 и 7: для них характерно уплощение спектров на флангах до значений $-(2.0-2.2)$. Такое свойство областей компрессии (*Shearh* и *CIR*) отмечалось ранее [Rakhmanova et al., 2022], и, как видно из данных табл. 1, не связано с присутствием структур средних масштабов.

Таблица 1. Наклоны спектров в трех областях околоземного пространства для рассмотренных событий

№	Дата, время	Тип, № интервала	Структуры	Наклон МГД			Наклон кинет.		
				СВ	Дн. МСЛ	Фланг	СВ	Дн. МСЛ	Фланг
1	09.07.14 г., 17:48 UT	Slow, 1	+	-1.7 ± 0.2	-1.0 ± 0.3	—	-2.7 ± 0.1	-2.6 ± 0.1	-2.1 ± 0.3
2	09.07.14 г., 18:13 UT	Slow, 2	—	-1.8 ± 0.2	—	—	-2.3 ± 0.1	-2.0 ± 0.1	-1.7 ± 0.2
3	09.07.14 г., 18:40 UT	Slow, 3	+	-1.6 ± 0.1	-1.2 ± 0.3	-0.8 ± 0.1	-2.3 ± 0.1	-2.3 ± 0.1	-2.4 ± 0.2
4	07.02.14 г., 17:18 UT	Sheath, 1	+	-1.8 ± 0.1	-2 ± 0.3	-1.6 ± 0.1	-2.5 ± 0.1	-3.5 ± 0.1	-3.0 ± 0.1
5	07.02.14 г., 18:45 UT	Sheath, 2	—	-1.6 ± 0.2	-0.6 ± 0.2	-1.5 ± 0.1	-3.2 ± 0.1	-3.5 ± 0.2	-2.8 ± 0.1
6	07.02.14 г., 22:14 UT	Sheath, 3	+	-1.9 ± 0.1	-0.5 ± 0.2	-1.6 ± 0.1	-4.2 ± 0.2	-3.0 ± 0.2	-2.0 ± 0.1
7	08.02.14 г., 00:40	Sheath, 4	—	-1.9 ± 0.1	—	-1.7 ± 0.1	-3.5 ± 0.2	-3.2 ± 0.2	-2.2 ± 0.1
8	16.02.14 г., 04:08 UT	Sheath, 1	—	-1.8 ± 0.1	—	-1.4 ± 0.1	-2.6 ± 0.2	-3.0 ± 0.2	-3.2 ± 0.2
9	16.02.14 г., 04:22 UT	Sheath, 2	+	-1.6 ± 0.1	—	-1.7 ± 0.1	-2.9 ± 0.2	-3.4 ± 0.2	-2.6 ± 0.2
10	16.02.14 г., 05:06 UT	MC, 3	—	-1.9 ± 0.2	—	-1.7 ± 0.1	-2.3 ± 0.1	-4.1 ± 0.2	-2.8 ± 0.1
11	16.02.14 г., 05:35 UT	MC, 4	+	-1.8 ± 0.2	—	-1.3 ± 0.1	-2.2 ± 0.1	-4.8 ± 0.3	-2.6 ± 0.1

Следует отметить, что для рассматриваемых событий в периоды спокойного СВ на фланге анализировались спектры флуктуаций потока ионов, а в периоды возмущенного СВ на фланге рассматривались флуктуации модуля магнитного поля. Однако наклоны спектров, полученные для потока ионов, хорошо согласуются с полученными ранее для флуктуаций модуля магнитного поля в этой же области [Rakhmanova et al., 2022] также для спокойных условий в СВ. Кроме того, сравнение спектров флуктуаций потока ионов и модуля магнитного поля на фланге (на разном удалении в сторону хвоста магнитосферы) со спутников Спектр-Р и THEMIS имеют одинаковый скейлинг. Несмотря на различие измеряемых параметров сжимаемые флуктуации демонстрируют одинаковый скейлинг, так что можно заключить, что выявленные в данной работе различия для спокойного

и возмущенного СВ обусловлены особенностями развития сжимаемой компоненты турбулентного каскада при различных условиях в СВ, а не разницей рассматриваемых параметров.

Таким образом, в периоды возмущенного солнечного ветра основные изменения в турбулентном каскаде (такие, как уплощение на МГД-масштабах и значительное укрупнение на кинетических масштабах) определяются крупномасштабным типом СВ и не зависят от динамики структур внутри крупномасштабного возмущения.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе на основе сопоставления одновременных измерений в трех точках околоземного пространства – в СВ, в дневном МСЛ и на фланге МСЛ – проанализировано, как может влиять

присутствие структур средних масштабов (вариаций, регистрируемых спутником за времена ~10 мин) на динамику турбулентного каскада за ОЗУВ. Показано, что:

– В периоды невозмущенного медленного СВ при отсутствии структур средних масштабов динамика турбулентного каскада в МСЛ определяется волновыми процессами, возникающими за ОЗУВ.

– В периоды невозмущенного медленного СВ в присутствии среднемасштабных структур за ОЗУВ наблюдаются наклоны спектров на МГД-масштабах, близкие к -1, что может быть связано с нарушением условий развитой турбулентности и отсутствием инерционной области в турбулентном каскаде; восстановления спектров, характерных для развитой турбулентности, на флангах МСЛ не происходит.

– В периоды спокойного медленного СВ характеристики турбулентности на кинетических масштабах не изменяются при входе плазмы в МСЛ и распространении к флангам, что свидетельствует об универсальности процессов диссипации энергии перед и за ОЗУВ; в ряде случаев может наблюдаться уплощение спектров при распространении плазмы к флангам, вызванное, вероятно, локальными неустойчивостями.

– Присутствие среднемасштабных структур на фоне крупномасштабных возмущений в СВ не оказывает влияния на модификацию характеристик турбулентности на ОЗУВ: все изменения – отсутствие Колмогоровского скейлинга на МГД-масштабах и укрупнение спектров на кинетических масштабах в дневном МСЛ и восстановление формы, близкой к наблюдаемой в СВ, на флангах – соответствуют представленной ранее статистике как в присутствии, так и в отсутствии структур средних масштабов.

Таким образом, показано, что основной вклад в развитие турбулентного каскада на ОЗУВ вносят крупномасштабные возмущения в солнечном ветре. Динамика структур меньших масштабов (порядка 10 мин) может иметь влияние на турбулентность за ОЗУВ на фоне спокойных условий в солнечном ветре.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-12-00227, <https://rscf.ru/project/22-12-00227/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений сол-

нечного ветра для периода 1976–2000 гг. // *Космич. исслед.* Т. 47. № 2. С. 99–113. 2009.

– 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. 2013.

– Пулинец М.С., Рязанцева М.О., Антонова Е.Е., Курпичев И.П. Зависимость параметров магнитного поля вблизи подсолнечной точки магнитосферы от межпланетного магнитного поля по данным эксперимента THEMIS // *Геомагнетизм и аэронавигация.* Т. 52. № 6. С. 769–778. 2012.

– Рахманова Л.С., Рязанцева М.О., Застенкер Г.Н., Веригин М.И., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Влияние параметров межпланетной среды и границ магнитослоя на величину коэффициента корреляции между потоком ионов в солнечном ветре и магнитослое // *Геомагнетизм и аэронавигация.* Т. 58. № 4. С. 463–470. 2018.

– Рахманова Л.С., Рязанцева М.О., Застенкер Г.Н., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Чесалин Л.С. Влияние характеристик турбулентности плазмы солнечного ветра на свойства турбулентного каскада в магнитослое // *Космические исслед.* Т. 57. № 6. С. 1–8. 2019.

– Alexandrova O., Lacombe C., Mangeney A., Grappin R., Maksimovic M. Solar wind turbulent spectrum at plasma kinetic scales // *Astrophys. J.* V. 760. № 2. P. 121–126. 2012. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/760/2/121>

– Alexandrova O., Chen C.H.K., Sorriso-Valvo L., Horbury T.S., Bale S.D. Solar Wind Turbulence and the Role of Ion Instabilities // *Space Sci. Rev.* V. 178. P. 101–139. 2013. <https://doi.org/10.1007/s11214-013-0004-8>

– Anderson B.J., Fuselier S.A., Gary S.P., Denton R.E. Magnetic spectral signatures in the Earth's magnetosheath and plasmadepletion layer // *J. Geophys. Res.* V. 99. P. 5877–5891. 1994. <https://doi.org/10.1029/93JA02827>

– Angelopoulos V. The THEMIS mission // *Space Sci. Rev.* V. 141. P. 5–34. 2008. <https://doi.org/10.1007/s11214-008-9336-1>

– Auster H.U., Glassmeier K.H., Magnes W., et al. The THEMIS Fluxgate Magnetometer // *Space Sci. Rev.* V. 141. № 1–4. P. 235–264. 2008. <https://doi.org/10.1007/s11214-008-9365-9>

– Blum L.W., Koval A., Richardson I.G., Wilson L.B., Malaspina D., Greeley A., Jaynes A.N. Prompt response of the dayside magnetosphere to discrete structures within the sheath region of a coronal mass ejection // *Geophysical Research Letters.* V. 48. e2021GL092700. 2021. <https://doi.org/10.1029/2021GL092700>

– Boldyrev S., Perez J. C. Spectrum of Kinetic Alfvén Turbulence // *Astrophys. J. Lett.* V. 758. № 2. L44. 2012. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/758/2/L44>

– Borodkova N., Zastenker G., Riazantseva M., Richardson J. Large and sharp solar wind dynamic pressure variations as a source of geomagnetic field disturbances at the geosynchronous orbit // *Planet. Space Sci.* V. 53. P. 25–32. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2004.09.025>

- Breuillard H., Matteini L., Argall M. R., et al. New Insights into the Nature of Turbulence in the Earth's Magnetosheath Using Magnetospheric Multi Scale Mission Data // *Astrophys. J.* V. 859. 127. 2018. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aabae8>
- Breuillard H., Yordanova E., Vaivads A., Alexandrova O. The effects of kinetic instabilities on small-scale turbulence in Earth's magnetosheath // *Astrophys. J.* V. 829. 54. 2016. <https://doi.org/10.3847/0004-637X/829/1/54>
- Bruno R., Carbone V., Vörös Z., et al. Coordinated Study on Solar Wind Turbulence During the Venus-Express, ACE and Ulysses Alignment of August 2007 // *Earth Moon Planets.* V. 104. P. 101–104. 2009. <https://doi.org/10.1007/s11038-008-9272-9>
- Bruno R., Carbone V. The Solar Wind as a Turbulence Laboratory // *Living Rev. Sol. Phys.* V. 10. № 2. 2013. <https://doi.org/10.12942/lrsp-2013-2>
- Chen C.H.K. Recent progress in astrophysical plasma turbulence from solar wind observations. // *J. Plasma Phys.* V. 82. 535820602. 2016. <https://doi.org/10.1017/S0022377816001124>
- Chen C.H.K., Boldyrev S. Nature of Kinetic Scale Turbulence in the Earth's Magnetosheath // *Astrophys. J.* V. 842. P. 122–131. 2017. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa74e0>
- Czaykowska A., Bauer T.M., Treumann R.A., and Baumjohann W. Magnetic field fluctuations across the Earth's bow shock // *Ann. Geophys.* V. 19. P. 275–287. 2001. <https://doi.org/10.5194/angeo-19-275-2001>
- Dmitriev A.V., Lalchand B., Ghosh S. Mechanisms and Evolution of Geoeffective Large-Scale Plasma Jets in the Magnetosheath // *Universe.* V. 7. 152. <https://doi.org/10.3390/universe7050152>
- Huang S.Y., Hadid L.Z., Sahraoui F., Yuan Z.G., Deng X.H. On the Existence of the Kolmogorov Inertial Range in the Terrestrial Magnetosheath Turbulence // *Astrophys. J. Lett.* V. 836. L10. 2017. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/836/1/L10>
- Lacombe C., Belmont G. Waves in the Earth's magnetosheath: Observations and interpretations // *Adv. Sp. Res.* V. 15. P. 329–340. 1995. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(94\)00113-F](https://doi.org/10.1016/0273-1177(94)00113-F)
- LaMoury A.T., Hietala H., Plaschke F., Vuorinen L., Eastwood J.P. Solar wind control of magnetosheath jet formation and propagation to the magnetopause. *J. Geophys. Res. Space Phys.* // V. 126. № 9. e2021JA029592. 2021. <https://doi.org/10.1029/2021ja029592>
- Lepping R.P., Acuna M.H., Burlaga L.F., et al. The WIND magnetic field investigation // *Space Sci. Rev.* V. 71. № 1–4. P. 207–229. 1995. <https://doi.org/10.1007/BF00751330>
- Li H., Jiang W., Wang C., Verscharen D., Zeng C., Russell C.T., Giles B., Burch J.L. Evolution of the Earth's Magnetosheath Turbulence: A Statistical Study Based on MMS Observations // *Astrophys. J.* V. 898. L43. 2020. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aba531>
- Lin R.P., Anderson K.A., Ashford S., et al. Three-Dimensional Plasma and Energetic Particle Investigation for the Wind Spacecraft // *Space Sci. Rev.* V. 71. P. 125–153. 1995. <https://doi.org/10.1007/BF00751328>
- McFadden J.P., Carlson C.W., Larson D., Ludlam M., Abiad R., Elliott B., Turin P., Marckwordt M., Angelopoulos V. The THEMIS ESA plasma instrument and in-flight calibration // *Space Sci. Rev.* V. 141. P. 277–302. 2008. <https://doi.org/10.1007/s11214-008-9440-2>
- Němeček Z., Šafránková J., Zastenker G. N., Pišoft P., Paularena K.I., and Richardson J.D. Observations of the radial magnetosheath profile and a comparison with gasdynamic model 1024 predictions // *Geophys. Res. Lett.* V. 27. P. 2801–2804. 2000. <https://doi.org/10.1029/2000GL000063>
- Ogilvie K.W., Chornay D.J., Fritzenreiter R.J., et al. SWE, a comprehensive plasma instrument for the Wind spacecraft // *Space Sci. Rev.* V. 71. № 1–4. P. 55–77. 1995. <https://doi.org/10.1007/BF00751326>
- Pitňa A., Šafránková J., Němeček Z., Goncharov O., Němec F., Přeč L., Chen C.H.K., Zastenker G. Density fluctuations upstream and downstream of interplanetary shocks // *Astrophys. J.* V. 819. 41–50. 2016. <https://doi.org/10.3847/0004-637X/819/1/41>
- Rakhmanova L., Riazantseva M., Zastenker G., Yermolaev Y., and Lodkina I. Dynamics of Plasma Turbulence at Earth's Bow Shock and through the Magnetosheath // *Astrophys. J.* V. 901. № 30. P. 30–40. 2020. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abae00>
- Rakhmanova L., Riazantseva M., Zastenker G., and Yermolaev Y. Large-Scale Solar Wind Phenomena Affecting the Turbulent Cascade Evolution behind the Quasi-Perpendicular Bow Shock // *Universe.* V. 8. № 12. P. 611. 2022. <https://doi.org/10.3390/universe8120611>
- Rakhmanova L., Riazantseva M., Zastenker G., Verigin M. Kinetic-Scale Ion Flux Fluctuations Behind the Quasi-Parallel and Quasi-Perpendicular Bow Shock. // *J. Geophys. Res. Sp. Phys.* V. 123. P. 5300–5314. 2018. <https://doi.org/10.1029/2018JA025179>
- Šafránková J., Hayosh M., Gutinska O., Němeček Z., Přeč L. Reliability of prediction of the magnetosheath Bz component from the interplanetary magnetic field observations // *J. Geophys. Res.* V. 114. A12213. 2009. <https://doi.org/10.1029/2009JA014552>
- Šafránková J., Němeček Z., Přeč L., et al. Fast solar wind monitor (BMSW): description and first results // *Space Sci. Rev.* V. 175. P. 165–182. 2013. <https://doi.org/10.1007/s11214-013-9979-4>
- Schekochihin A.A., Cowley S., Dorland W., Hammett G., Howes G.G., Quataert E., Tatsuno T. Astrophysical gyrokinetics: kinetic and fluid turbulent cascades in magnetized weakly collisional plasmas // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* V. 182. P. 310–377. 2009. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/182/1/310>
- Schwartz S.J., Burgess D., Moses J.J. Low-frequency waves in the Earth's magnetosheath: present status // *Ann. Geophys.* V. 14. P. 1134–1150. 1996. <https://doi.org/10.1007/s00585-996-1134-z>

- *Shevyrev N.N., Zastenker G.N., Nozdrachev M.N., Němeček Z., Šafránková J., and Richardson J.D.* High and low frequency large amplitude variations of plasma and magnetic field in the magnetosheath: radial profile and some features // *Adv. Space Res.* V. 31. P. 1389–1394. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00008-5](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00008-5)
- *Shevyrev N.N., Zastenker G.N.* Some features of the plasma flow in the magnetosheath behind quasi-parallel and quasi-perpendicular bow shocks // *Planet. Space Sci.* V. 53. P. 95–102. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2004.09.033>
- *Smith C., Hamilton K., Vasquez B., Leamon R.* Dependence of the dissipation range spectrum of interplanetary magnetic fluctuations on the rate of energy cascade // *Astrophys. J.* V. 645: L85–L88. 2006. <https://doi.org/10.1086/506151>
- *Tsurutani B.T., Lakhina G.S., Verkhoglyadova O.P., Gonzalez W.D., Echer E., Guarnieri F.L.* A review of interplanetary discontinuities and their geomagnetic effects // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* V. 73. № 1. P. 5–19. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.04.001>
- *Turc L., Fontaine D., Escoubet C.P., Kilpua E.K.J., Dimmock A.P.* Statistical study of the alteration of the magnetic structure of magnetic clouds in the Earth's magnetosheath // *J. Geophys. Res. Sp. Phys.* V. 122. № 3. P. 2956–2972. 2017. <https://doi.org/10.1002/2016JA023654>
- *Verigin M.I., Tatrallyay M., Erdős G., Kotova G.A.* Magnetosheath – Interplanetary medium reference frame: Application for a statistical study of mirror type waves in the terrestrial plasma environment // *Adv. Space Res.* V. 37. P. 515–521. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.03.042>
- *Yermolaev Y.I., Nikolaeva N.S., Lodkina I.G., Yermolaev M.Y.* Geoeffectiveness and efficiency of CIR, sheath, and ICME in generation of magnetic storms // *J. Geophys. Res.* V. 117. A00L07. 2012. <https://doi.org/10.1029/2011JA017139>

Role of Middle-Scale Solar Wind Structures in the Turbulence Development Behind the Bow Shock

L. S. Rakhmanova^{1,*}, M. O. Riazantseva^{1,**}, A. A. Khokhlachev^{1,***}, Yu. I. Yermolaev^{1,****},
G. N. Zastenker^{1,*****}

¹*Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**e-mail: rakhnud@gmail.com*

***e-mail: orearm@gmail.com*

****e-mail: aleks.xaa@yandex.ru*

*****e-mail: yermol@iki.rssi.ru*

******e-mail: gzastenk@iki.rssi.ru*

Present study estimates contribution of the middle-scale solar wind structures (variations which are registered by a spacecraft during ~10 min intervals) in the turbulence development in the transition region behind the bow shock. The analysis is based on simultaneous measurements of plasma and/or magnetic field parameters in the solar wind, in the dayside magnetosheath and at the flanks. The study adopts measurements by Wind, THEMIS and Spektr-R spacecraft. Properties of magnetic field and ion flux fluctuation spectra are analyzed in the frequency range 0.01–4 Hz, which corresponds to transition from MHD to kinetic scales. The dynamics of turbulence properties in the magnetosheath is governed by large-scale disturbances while structures with smaller scales have effect during absence of large-scale structures.

Keywords: solar wind, magnetosheath, plasma, turbulence, space weather