

---

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО КАСКАДА  
В МАГНИТОСЛОЕ В ПЕРИОДЫ ICME****FEATURES OF TURBULENT CASCADE DEVELOPMENT  
IN THE MAGNETOSHEATH DURING ICME**

---

**Л.С. Рахманова***Институт космических исследований РАН,  
Москва, Россия, rakhnud@gmail.com***М.О. Рязанцева***Институт космических исследований РАН,  
Москва, Россия, orearm@gmail.com***А.А. Хохлячев***Институт космических исследований РАН,  
Москва, Россия, aleks.xaa@yandex.ru***Ю.И. Ермолаев***Институт космических исследований РАН,  
Москва, Россия, yermol@cosmos.ru***Г.Н. Застенкер***Институт космических исследований РАН,  
Москва, Россия, gzastenk@iki.rssi.ru***L.S. Rakhmanova***Space Research Institute RAS,  
Moscow, Russia, rakhnud@gmail.com***M.O. Riazantseva***Space Research Institute RAS,  
Moscow, Russia, orearm@gmail.com***A.A. Khokhlachev***Space Research Institute RAS,  
Moscow, Russia, aleks.xaa@yandex.ru***Yu.I. Yermolaev***Space Research Institute RAS,  
Moscow, Russia, yermol@cosmos.ru***G.N. Zastenker***Space Research Institute RAS,  
Moscow, Russia, gzastenk@iki.rssi.ru*

---

**Аннотация.** Крупномасштабные возмущения в межпланетном пространстве являются главной причиной глобальных возмущений внутри магнитосферы Земли. Как известно, перед магнитосферой располагается магнитослой — переходная область, в которой характеристики плазмы и магнитного поля, а также их вариации существенно отличаются от таковых в солнечном ветре. В частности, ранее было показано, что прохождение плазмы через магнитослой может существенно изменять характеристики каскада турбулентных флуктуаций солнечного ветра, причем характер изменений отличается для спокойных и возмущенных условий в межпланетной среде. В настоящей работе на основе анализа нескольких случаев взаимодействия межпланетных корональных выбросов массы (ICME) с магнитосферой проанализированы особенности формирования турбулентного каскада в магнитослое в эти периоды. Анализ проводился на основе сопоставления одновременных измерений вариаций магнитного поля в солнечном ветре и в дневном магнитослое спутниками Wind, Cluster, THEMIS и MMS в 2016–2017 гг. Показано, что взаимодействие ICME с магнитосферой сопровождается наименьшим изменением мощности флуктуаций в случае наличия области сжатия перед ним и, напротив, при отсутствии области сжатия мощность флуктуаций значительно возрастает. Определено, что ICME, вызывающие значительные изменения индекса *Dst*, сопровождаются слабой модификацией турбулентного каскада в магнитослое, тогда как наиболее значимые изменения свойств турбулентности наблюдаются для ICME, которые не приводят к сильным геомагнитным возмущениям.

**Ключевые слова:** солнечный ветер, магнитослой, турбулентность, космическая плазма.

**Abstract.** Large-scale disturbances in the interplanetary medium are the main cause of the global perturbations inside Earth's magnetosphere. Transition region called magnetosheath is known to be located in front of the magnetosphere in which plasma and magnetic field properties, as well as their variations differ significantly from those in the solar wind. Particularly, plasma passage through the magnetosheath has been demonstrated to modify substantially features of the cascade of turbulent fluctuations of the solar wind, with the pattern of the modification being different for quiet and disturbed conditions in the interplanetary medium. In this study, we examine features of turbulent cascade formation in the magnetosheath during interplanetary manifestation of coronal mass ejection (ICME), by analyzing several cases of ICME interactions with the magnetosphere. The analysis is conducted by comparing magnetic field variations measured simultaneously in the solar wind and in the dayside magnetosheath by Wind, Cluster, THEMIS, and MMS spacecraft in 2016–2017. Interaction of ICME with the magnetosphere is shown to cause the least change in the fluctuation power if there is a compression region in front of it; on the opposite, when there is no compression region, the fluctuation power increases considerably. ICMEs that caused significant changes in the *Dst* index were determined to be accompanied by the least changes in the turbulent cascade in the magnetosheath, whereas the most significant modification of the turbulence features were observed during ICMEs which did not trigger substantial geomagnetic disturbances.

**Keywords:** solar wind, magnetosheath, turbulence, space plasma.

## ВВЕДЕНИЕ

Известно, что основными источниками глобальных магнитосферных возмущений являются крупномасштабные межпланетные возмущения [Yermolaev et al., 2015; Borovsky, Denton, 2006]. При этом исследования геоэффективности солнечного ветра (СВ) и связи геомагнитных возмущений с параметрами межпланетной среды, как правило, проводятся на основе измерений в окрестности точки L1, находящейся в 1.5 млн км от орбиты Земли [Pallochia et al., 2006; Boynton et al., 2012; Podladchikova, Petrukovich, 2012], и не учитывают процессы в пограничных слоях магнитосферы. Перед внешней границей магнитосферы — магнитопаузой — постоянно существуют отошедшая ударная волна (околоземная ударная волна, ОЗУВ) и переходная область, формирующаяся из-за обтекания магнитосферы сверхзвуковым и сверхальфвеновским потоком СВ. В переходной области, или магнитослое (МСЛ), характеристики плазмы и магнитного поля существенно изменяются — происходит поджатие магнитных силовых линий, изменение направления магнитного поля, сжатие, замедление и нагрев плазмы, а также существенное увеличение мощности флуктуаций всех параметров. Процессы в МСЛ зависят от взаимного расположения ОЗУВ и межпланетного магнитного поля: из-за присутствия за квазипараллельной ОЗУВ ионов, отраженных от ОЗУВ и затем сносимых плазмой СВ в МСЛ, амплитуда вариаций параметров плазмы и магнитного поля за квазипараллельной ОЗУВ на порядок выше, чем за квазиперпендикулярной, и может достигать порядка величины самого параметра [Greenstadt, 1972; Shevryev, Zastenker, 2005]. Кроме того, анизотропия температуры, возникающая на квазиперпендикулярной ОЗУВ, приводит к развитию большого числа неустойчивостей и волновых процессов за ней [Schwartz et al., 1996; Lacombe, Belmont, 1995].

Несмотря на то, что существуют общие представления о глобальном изменении характеристик плазмы и поля за ОЗУВ и оно может быть в среднем описано в рамках газодинамических и магнитогидродинамических (МГД) моделей [Spreiter et al., 1966; Tóth et al., 2005] на масштабах, сопоставимых с размерами магнитосферы ( $\sim 10^5$  км), процессы на меньших масштабах ( $\sim 10^2$ – $10^3$  км) могут быть воспроизведены только трудоемкими в реализации гибридными и кинетическими моделями (например, [Karimabadi et al., 2014; Palmroth et al., 2018]), которые невозможно использовать в рамках прогноза космической погоды. Как показывают исследования, проведенные на основе одновременных измерений перед и за ОЗУВ, направление магнитного поля непосредственно перед магнитопаузой может не соответствовать зарегистрированному в СВ [Šafránková et al., 2009; Pulinetz et al., 2014]. Кроме того, последние исследования показывают, что в периоды таких геоэффективных крупномасштабных явлений, как межпланетные корональные выбросы массы (Interplanetary Coronal Mass Ejection, ICME), также могут

наблюдаться несоответствия направления поля в МСЛ и СВ [Turc et al., 2017] на временных масштабах порядка часа. Поскольку  $B_z$ -компонента межпланетного магнитного поля рассматривается как наиболее важный параметр межпланетной среды, определяющий динамику магнитосферы, процессы в МСЛ важно учитывать для более корректных представлений о солнечно-земных связях.

На масштабах, сопоставимых с гирорадиусом протона, важную роль в космической плазме приобретают кинетические эффекты, начинается диссипация энергии, и МГД-описание становится неприменимым. Совокупность процессов, происходящих на масштабах менее  $10^3$  км, можно анализировать на основе характеристик турбулентного каскада. В последние годы большой объем экспериментальных данных с высоким временным разрешением позволил существенно расширить представление о свойствах турбулентности в МСЛ (например, [Zimbardo et al., 2010; Sahraoui et al., 2020; Rakhmanova et al., 2021]). Для невозмущенной плазмы СВ спектр турбулентных флуктуаций магнитного поля имеет универсальный вид, описываемый степенной функцией с показателем  $-5/3$  (колмогоровский скейлинг) на масштабах более ионного гирорадиуса (МГД-масштабы). На масштабах порядка инерционной длины протона происходит излом спектра и переход к кинетическим масштабам, на которых спектр также описывается степенной функцией с показателем  $\alpha$ . Согласно статистическим данным, в среднем  $\alpha = -(2.8 \div 3)$ , тогда как, согласно теоретическим предсказаниям,  $\alpha$  составляет от  $-7/3$  [Schekochihin et al., 2009] до  $-8/3$  [Boldyrev, Perez, 2012]. Большинство исследований показывает, что на ОЗУВ происходит изменение характеристик спектров турбулентных флуктуаций: нарушается колмогоровский скейлинг на МГД-масштабах [Czaykowska et al., 2001; Huang et al., 2017; Рахманова и др., 2018; Rakhmanova et al., 2024a] и спектры могут быть описаны степенными функциями с показателем  $-1$ , характерными для совокупности некогерентных волн или для масштабов накачки энергии. На кинетических масштабах ряд исследований показал существенное укрупнение спектров флуктуаций за ОЗУВ [Rakhmanova et al., 2018, 2024a], предположительно вызванное усилением диссипации энергии в результате большого количества волновых процессов и неустойчивостей, характерных для МСЛ.

Следует также отметить, что характеристики турбулентности зависят от типа плазмы СВ, определяемого в основном его источником на Солнце [Bruno et al., 2014; Рязанцева и др., 2019, 2020; Ervin et al., 2024]. Кроме того, в работах [Рахманова и др., 2024; Rakhmanova et al., 2024b] показано, что для СВ разных типов характерна различная динамика свойств турбулентности за ОЗУВ, в том числе различная степень модификации турбулентного каскада в дневном МСЛ и специфический характер его восстановления при распространении плазмы к флангам МСЛ.

Таким образом, исследование особенностей формирования турбулентного каскада в МСЛ во время возмущений в СВ может дать представление о про-

цессах, происходящих в переходной области в периоды наблюдения потенциально геоэффективных явлений в межпланетной среде, и дополнить существующие представления о солнечно-земных связях. В настоящей работе были рассмотрены 15 случаев регистрации ICME на орбите Земли и проанализированы изменения характеристик турбулентности плазмы при пересечении ОЗУВ в эти периоды. ICME являются межпланетными проявлениями солнечных эруптивных событий (выбросов корональной массы), которые приводят к формированию крупномасштабных магнитоплазменных структур, распространяющихся в межпланетной среде. Если скорость распространения магнитоплазменной структуры от Солнца превышает скорость окружающей плазмы СВ, перед ним, как перед поршнем, может формироваться область сжатия — Sheath, характеризующаяся повышенным плазменным давлением (плотностью и температурой) и мощностью флуктуаций. Если скорость распространения возмущения превышает локальную скорость быстрой МГД-волны, то перед поршнем формируется также межпланетная ударная волна. На орбите Земли ICME идентифицируется по набору параметров плазмы и магнитного поля [Ермолаев и др., 2009], а также по ионному составу и потокам энергичных частиц [Richardson, Cane, 2010]. Для ICME характерно увеличение магнитного поля по сравнению с окружающей СВ, значительное уменьшение температуры, увеличение скорости в начале события и ее снижение к концу. Кроме того, часто наблюдается увеличение относительного содержания альфа-частиц, а также ионов с большими зарядами, таких как железо и кислород. Как правило, на орбите Земли ICME наблюдается в двух формах — Ejecta или магнитное облако (Magnetic Cloud, MC). К MC относят ICME, которые характеризуются спокойным магнитным полем большой амплитуды без существенных вариаций, при этом наблюдается плавный поворот вектора магнитного поля на большой угол, существенное уменьшение температуры и плотности протонов и, как следствие, плазменного параметра  $\beta$  — отношения теплового давления к магнитному [Burlaga, 1991]. Различие ICME этих двух типов, вероятно, обуславливается различными траекториями пересечения их регистрирующими космическими аппаратами (КА) [Ермолаев и др., 2009; Kilrua et al., 2017]. Подробное описание формирования, распространения и внутренней структуры ICME можно найти, например, в обзоре [Kilrua et al., 2017]. В настоящей работе события отбирались из каталога [Ермолаев и др., 2009], при этом события типа Ejecta и MC рассматривались отдельно. События типа Ejecta, для которых не наблюдалось области сжатия Sheath перед ICME, рассматривались отдельно от событий с областью сжатия, тогда как в случае MC всегда присутствовала область сжатия. Периоды, соответствующие непосредственно областям сжатия Sheath, также рассматривались независимо. Кроме того, на основе анализа значений *Dst*-индекса были выделены события типа Ejecta, которые наблюдались и в СВ, и в МСЛ, но не сопровождались существенными геомагнитными возмущениями, и были определены характерные изменения свойств турбулентного каскада в указанные

периоды. Анализировались одновременные измерения характеристик турбулентности в СВ по данным спутника Wind и в МСЛ по данным какого-либо спутника миссий THEMIS, Cluster, MMS. Анализ проводился для 2016–2017 гг., поскольку этот период соответствовал спаду цикла солнечной активности и наблюдению достаточного количества геоэффективных событий в межпланетной среде и для него имеется большой объем доступных спутниковых данных, зарегистрированных в МСЛ.

## 1. ДАННЫЕ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Временные интервалы, соответствующие ICME, отбирались по каталогу [Ермолаев и др., 2009; <http://iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/>]. Для всех случаев наблюдения ICME в 2016–2017 гг. было определено положение спутников THEMIS, Cluster, MMS, а также установлено наличие измерений с этих космических аппаратов в отобранные временные интервалы, для чего использовался интернет-ресурс [[https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/sp\\_phys/](https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/sp_phys/)]. Положение спутника внутри МСЛ определялось путем анализа энергетического распределения ионов, плотности и скорости протонов. Отбирались только события, во время которых спутники находились в дневной части МСЛ ( $X_{GSE} > 5R_E$ ) и имелись быстрые измерения магнитного поля в МСЛ со спутника. Использовались данные приборов FGM: на спутниках THEMIS [Auster et al., 2008] с частотой опроса 4 вектора в секунду, на спутниках Cluster [Balogh et al., 2001] с частотой опроса 5 векторов в секунду, на спутниках MMS с частотой опроса 16 векторов в секунду (в быстрой моде) [Russell et al., 2016]. При наличии измерений магнитного поля для выбранного события сопоставлялись измерения со спутников в МСЛ и в СВ. Использовались измерения параметров плазмы в СВ прибором SWE [Ogilvie et al., 1995] с временным разрешением 92 с и магнитного поля прибором MFI [Lepping et al., 1995] с частотой опроса 11 векторов в секунду на спутнике Wind в окрестности точки либрации L1. Анализ параметров плазмы в МСЛ проводился по данным приборов ESA/THEMIS [McFadden et al., 2008], CIS/Cluster [Rème et al., 2001] и FPI/MMS [Pollock et al., 2016]. Всего было выбрано 15 событий регистрации ICME на орбите Земли.

Для сопоставления данных, полученных в СВ и МСЛ, необходимо корректно определить время распространения плазмы между космическими аппаратами. Время распространения определялось корреляционным анализом временных рядов плотности протонов со спутника Wind и одного из спутников в МСЛ. Для этого измерения плотности приводились к общей временной сетке с разрешением 92 с, затем вычислялся предварительный временной сдвиг  $T_0 = dX/|V_X|$ , где  $dX$  — расстояние между спутниками вдоль оси  $X_{GSE}$ ;  $V_X$  — среднее значение компоненты скорости плазмы СВ вдоль оси  $X_{GSE}$ , измеренное спутником Wind в течение события. Далее проводилось вычисление коэффициента корреляции плотностей для диапазона временных сдвигов  $[T_0 - 3600 \text{ с}; T_0 + 3600 \text{ с}]$ . Коэффициент корреля-



ции вычислялся на интервале длительностью от 2 до 8 ч, в зависимости от доступного интервала данных. Определялся сдвиг  $dT$ , соответствующий максимуму коэффициента корреляции, и полученное значение выбиралось в качестве временного сдвига для рассматриваемого интервала. Каждое значение  $dT$  проверялось вручную по визуальному совпадению фронтов плотности или компонент магнитного поля на двух спутниках и при необходимости корректировалось. На рис. 1 сопоставляются данные измерений КА Wind в СВ и КА MMS-1 в МСЛ для события 2–3 февраля 2016 г. На панелях *a*, *б* приведены измерения плотности и скорости протонов, левая ось ординат относится к спутнику в СВ, правая — к спутнику в МСЛ. На панелях *в*, *г* приведены модуль и компоненты магнитного поля в СВ и МСЛ. Горизонтальными стрелками над верхней панелью рисунка обозначены типы СВ — до 22:00 наблюдалась область сжатия перед ICME, с 22:00 наблюдался сам ICME, относящийся к типу Ejecta. Данные Wind сдвинуты на 4380 с. Хорошо видно совпадение временного хода плотности протонов на двух спутниках на всем интервале, а также локальные несоответствия плазменных структур, возникающие, как правило, из-за различия в скоростях их распространения.

Для определения геомагнитного отклика на рассматриваемое событие были проанализированы значения  $Dst$ -индекса из базы данных обсерватории Киото [<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/>]. На рис. 1, *г* приведены значения  $Dst$  с временным разрешением 1 ч. Видно, что приход ICME сопровождался геомагнитной бурей с минимальным значением  $Dst = -57$  нТл. В настоящей работе события были разделены на вызвавшие значительный отклик магнитосферы, если они сопровождался изменением  $Dst$  до значений менее  $-30$  нТл, и не вызвавшие значительного геомагнитного отклика, если  $Dst$  после прихода ICME не опускался ниже  $-30$  нТл.

Для дальнейшего анализа характеристик турбулентности в данном событии были выбраны два интервала, отмеченные на рис. 1 серой заливкой: интервал 1 относится к области Sheath, а интервал 2 — к области Ejecta. Интервалы отбирались исходя из их длительности ( $\sim 1$  ч), а также исходя из соображений квазистационарности параметров, т. е. без существенных скачков плотности или поворотов вектора магнитного поля, соответствующих, как правило, пересечению разрывов различных типов. Для каждого интервала временной сдвиг уточнялся дополнительно вручную.

Для выбранных интервалов с помощью фурье-анализа определялись характеристики турбулентности в СВ и МСЛ. Поскольку временное разрешение магнитометров на используемых спутниках различается, интервалы для вычисления спектров флуктуаций имеют разную длительность в СВ и в МСЛ. Такое различие связано с использованием фурье-анализа, накладывающего ограничение на число точек в спектре. В данном случае для спутников MMS-1 и Wind длительность интервалов составляет 68 мин и 50 мин соответственно. Интервалы выбирались таким образом, чтобы их центры совпадали.

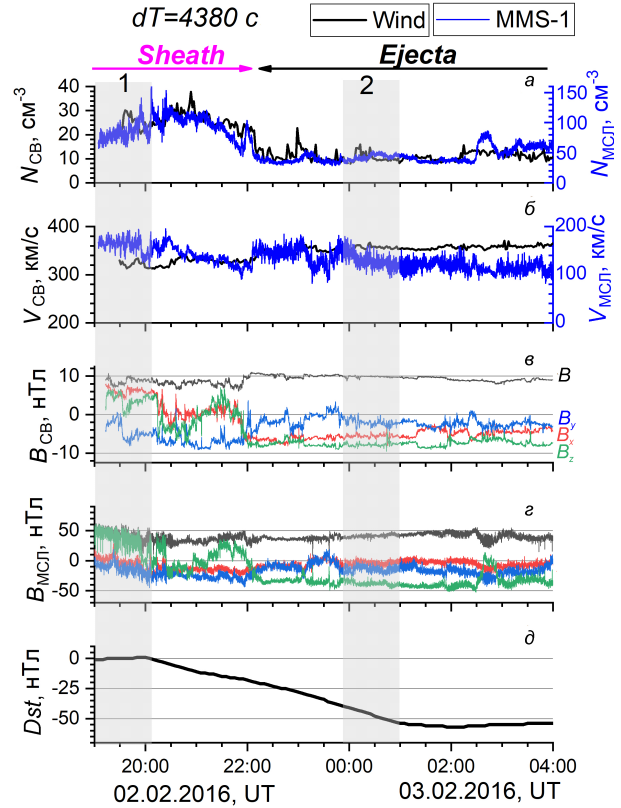


Рис. 1. Событие 2–3 февраля 2016 г.: плотность (*a*) и скорость (*б*) протонов и по измерениям на КА Wind в СВ и на КА MMS-1 в МСЛ; модуль и компоненты магнитного поля по измерениям на Wind в СВ (*в*) и на MMS-1 в МСЛ (*г*); индекс  $Dst$  (*д*)

Фурье-спектры вычислялись для флуктуаций как вектора магнитного поля (сумма спектров флуктуаций компонент поля), так и модуля магнитного поля. Флуктуации вектора магнитного поля являются суммой несжимаемой (альфвеновской) компоненты флуктуаций, тогда как флуктуации модуля магнитного поля отображают сжимаемую (компрессионную) компоненту. Как правило, в СВ вклад компрессионной компоненты флуктуаций в каскад пренебрежимо мал, и турбулентность рассматривается как чисто альфвеновская [Schekochihin et al., 2009]. В МСЛ доля флуктуаций сжатия становится существенной [Huang et al., 2017], что является важной отличительной чертой турбулентности в этой области.

На рис. 2 приведены вычисленные спектры для интервалов, отмеченных серым на рис. 1: панели *a*, *в* относятся к интервалу 1 (Sheath), панели *б*, *г* — к интервалу 2 (Ejecta). На панелях *a*, *б* показаны спектры в СВ, на панелях *в*, *г* — в МСЛ. Необходимо отметить, что на рассматриваемых масштабах в СВ шумы прибора MFI могут внести значимый вклад в спектры флуктуаций на частотах более 0.7 Гц [Woodham et al., 2018]. Чтобы избежать влияния шума на результаты анализа, предварительно определялось отношение спектров измеренных флуктуаций к спектру шума, вычисленному по методике [Woodham et al., 2018], и определялась частота, на которой соотношение сигнал/шум превышало 5. На частотах, превышающих указанную, аппроксимация спектров не проводилась. Шумовые спектры прибора



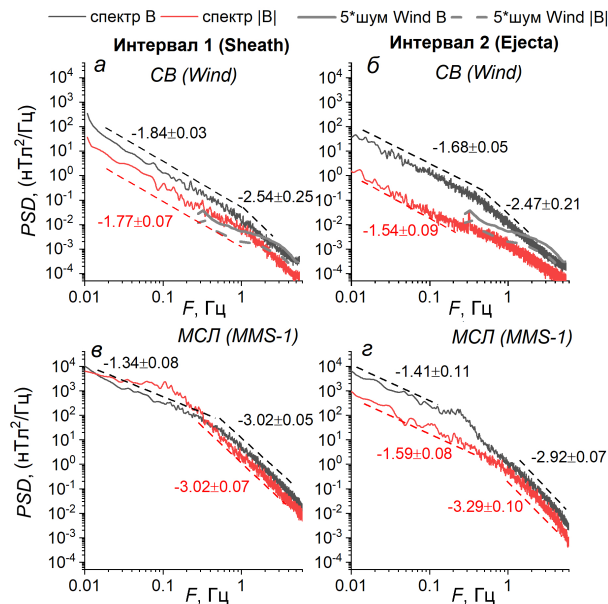


Рис. 2. Спектры (сплошные линии) флуктуаций компонент (черные кривые) и модуля (красные кривые) магнитного поля в СВ (а, б) и в МСЛ (в, г) для интервалов 1 (а, в) и 2 (б, г) на рис. 1, а также результаты аппроксимации спектров (штриховые линии). Серые линии на панелях а, б — шумовые спектры прибора MFI, умноженные на коэффициент 5: сплошные — спектры флуктуаций компонент магнитного поля, штриховые — спектры флуктуаций модуля магнитного поля

MFI, умноженные на коэффициент 5, показаны на рис. 2 а, б серым цветом.

Для полученных спектров хорошо выделяются два масштаба, разделенные изломом: МГД и кинетический. На указанных масштабах проводилась линейная аппроксимация спектров в логарифмическом масштабе для каждого диапазона и определялся показатель степенной функции (наклон) спектра. В ряде случаев такая аппроксимация невозможна из-за присутствия в спектре пика (спектр флуктуаций модуля магнитного поля на рис. 2, в) или из-за достижения уровня шума (спектр флуктуаций модуля магнитного поля на рис. 2, б).

Для подавляющего большинства событий в СВ, проанализированных как в данной работе, так и в более ранних статистических исследованиях [Woodham et al., 2018], излом спектра наблюдается на частотах более 0.1 Гц. В настоящей работе для оценки мощности флуктуаций на МГД-масштабах был выбран диапазон частот 0.095–0.105 Гц. Для каждого полученного спектра была определена мощность флуктуаций вектора и модуля магнитного поля в СВ и в МСЛ.

Как видно на рис. 2, в СВ в период Sheath спектры на МГД-масштабах несколько более крутые ( $\sim -1.8$ ), чем колмогоровский спектр с показателем наклона  $-5/3$ . Такой наклон характерен для областей Sheath [Riazantseva et al., 2024]. В период Ejecta спектры имеют наклон, близкий к колмогоровскому на МГД-масштабах. Для интервала 1 внутри Sheath спектр флуктуаций модуля магнитного поля имеет скейлинг, близкий к скейлингу спектра флуктуаций вектора поля, при этом мощность флуктуаций вектора и модуля магнитного поля различается

в три раза. Как правило, для СВ характерна большая разница в мощности (в 10 и более раз), обусловленная доминирующим вкладом альфвеновских несжимаемых флуктуаций, что наблюдается, например, для периода Ejecta (см. рис. 2, б), для которого мощность компрессионной компоненты меньше в  $\sim 40$  раз. Однако область Sheath характеризуется высокими значениями плотности, что и вызывает увеличение доли сжимаемой компоненты флуктуаций. На кинетических масштабах спектры флуктуаций имеют показатели наклонов, близкие значению  $-8/3$ , приведенному в ряде теоретических описаний турбулентности.

В МСЛ спектры характеризуются уплощением на МГД-масштабах и отклонением скейлинга от колмогоровского для флуктуаций вектора магнитного поля. При этом в период Sheath пик наблюдается в спектре флуктуаций модуля поля, а в период Ejecta — в спектре вектора поля. Диапазон частот, на котором наблюдался пик, исключался из рассмотрения. Обсуждение природы указанных пиков выходит за рамки настоящей работы. Как правило, такие пики обусловлены волновыми процессами в МСЛ вследствие анизотропии температуры, причем тип процесса зависит от внешних условий [Schwartz et al., 1996; Lacombe, Belmont, 1995]. Для обоих интервалов характерно укручение спектров на кинетических масштабах. Для интервала Sheath мощность флуктуаций вектора и модуля магнитного поля близка как на МГД, так и на кинетических масштабах, что свидетельствует о существенном вкладе компрессионных флуктуаций в каскад. Для интервала Ejecta в МСЛ на МГД-масштабах, так же как и в СВ, доля флуктуаций сжатия существенно меньше, чем доля альфвеновских флуктуаций, тогда как на кинетических масштабах их вклад возрастает.

Важной характеристикой турбулентности является также частота излома спектров, поскольку считается, что масштаб, на котором проявляется излом, связан с механизмом диссипации энергии и нагрева плазмы. Однако выделение этого масштаба требует значительной статистики, и даже при наличии таковой он до сих пор не определен однозначно (см., например, [Woodham et al., 2018]). В настоящей работе статистика не позволяет достоверно утверждать, каким масштабом определяется излом спектра, поэтому данный вопрос оставлен за рамками исследования.

В общей сложности для 15 событий ICME было выделено 47 интервалов, разделенных по типу ICME и интенсивности спровоцированных ими геомагнитных возмущений на следующие группы: 1) ICME типа Ejecta, перед которым наблюдалась область сжатия и после прихода которого было зарегистрировано  $Dst < -30$  нТл, т. е. наблюдалось геомагнитное возмущение (GS) — Ejecta/Sh/GS; 2) ICME типа Ejecta, перед которым наблюдалась область сжатия и после прихода которого было зарегистрировано  $Dst > -30$  нТл, т. е. не наблюдалось существенного геомагнитного возмущения — Ejecta/Sh/noGS; 3) ICME типа Ejecta, перед которым не наблюдалось области сжатия и  $Dst > -30$  нТл — Ejecta/noSh; 4) область сжатия Sheath, после прихода которой было

Типы рассмотренных интервалов и их характеристики

| Тип            | Количество интервалов | Отклик магнитосферы | Количество интервалов с пиком в МСЛ | Среднее значение $B_z$ в СВ, нТл | Среднее значение $V$ в СВ, км/с |
|----------------|-----------------------|---------------------|-------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Ejecta/Sh/GS   | 8                     | +                   | 5                                   | $-5.3 \pm 3.3$                   | $355 \pm 4$                     |
| Ejecta/Sh/noGS | 13                    | —                   | 10                                  | $3.7 \pm 4.1$                    | $420 \pm 64$                    |
| Ejecta/noSh    | 13                    | —                   | 10                                  | $1.2 \pm 2.1$                    | $382 \pm 42$                    |
| Sh             | 8                     | +                   | 2                                   | $0.7 \pm 3.2$                    | $422 \pm 109$                   |
| MC             | 5                     | +                   | 1                                   | $-6.3 \pm 5.7$                   | $473 \pm 100$                   |

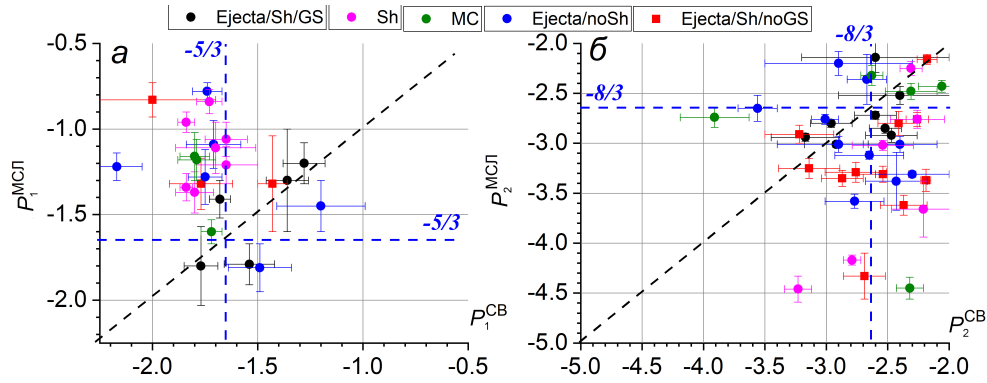


Рис. 3. Зависимость наклона спектра флуктуаций вектора магнитного поля в МСЛ от наклона в СВ на МГД-масштабах (а) и на кинетических масштабах (б)

зарегистрировано  $Dst < -30$  нТл — Sh; 5) ICME типа MC, после прихода которого было зарегистрировано  $Dst < -30$  нТл — MC. Количество интервалов каждого типа и наличие/отсутствие отклика магнитосферы на событие, а также средние значения  $B_z$ -компоненты межпланетного магнитного поля и скорости плазмы СВ для выделенной группы событий приведены в таблице. Как показывают результаты статистических исследований [Рахманова и др., 2024; Rakhmanova et al., 2024b], для возмущенных периодов в СВ, и в частности для периода прохождения ICME, характерна существенная модификация турбулентного каскада во всей дневной части МСЛ, вне зависимости от расположения спутника относительно магнитопаузы и ОЗУВ. Поэтому в данной работе не проводилось разделения интервалов вблизи границ и в середине МСЛ. Разделения по типу ОЗУВ, за которой велись измерения, также не проводилось.

На основе полученной статистики было рассмотрено изменение при пересечении ОЗУВ: 1) мощности флуктуаций  $PSD$  на МГД-масштабах; 2) степени сжатия (коэффициента компрессии) на МГД-масштабах  $CC = PSD_{|B|} / PSD_B$ , где  $PSD_{|B|}$  — мощность флуктуаций спектра модуля магнитного поля,  $PSD_B$  — мощность флуктуаций вектора магнитного поля; 3) наклонов  $P_1$  и  $P_2$  на МГД и кинетических масштабах соответственно для каждого типа интервалов. Результаты анализа приведены в следующем разделе.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3 приведено сравнение наклонов спектров флуктуаций вектора магнитного поля в СВ и МСЛ на МГД (а) и на кинетических (б) масштабах для событий разных типов. На флуктуации модуля магнитного поля в СВ сильно влияет шум прибора MFI,

что затрудняет определение наклонов спектров этих флуктуаций для кинетических масштабов. В связи с этим сравнение скейлинга флуктуаций проводилось только для вектора магнитного поля. Черные штриховые линии обозначают равенство наклонов спектров перед и за ОЗУВ, т. е. сохранение скейлинга при входе в МСЛ. Синие штриховые линии показывают модельные наклоны, характерные для каждого диапазона масштабов. Для интервалов, относящихся к Sheath и MC, в СВ спектры на МГД-масштабах близки к колмогоровским. Для остальных типов СВ наблюдается существенный разброс значений наклонов. В МСЛ большая часть спектров имеет наклоны, меньшие по модулю, чем в СВ и чем описывается в теориях. Заметим, что количество точек на рис. 3 может быть меньше, чем количество интервалов, указанное в таблице, поскольку в большом количестве случаев в МСЛ наблюдаются волновые явления и аппроксимация спектров на МГД-масштабах невозможна. В четвертом столбце таблицы указано количество случаев наблюдения четко выраженных пиков в спектрах флуктуаций вектора магнитного поля в МСЛ. Наиболее часто волновые явления наблюдаются для событий типа Ejecta/Sh/noGS — в 10 из 13 случаев, а также для событий типа Ejecta/noSh — в 10 из 13 случаев. Таким образом, для ICME, не вызвавших существенного отклика магнитосферы, в 76 % случаев в дневном МСЛ наблюдается значительная волновая активность. Для событий, в результате которых наблюдался значительный отклик магнитосферы, волновые процессы в МСЛ наблюдались в 38 % случаев.

Видно, что для событий типа Ejecta/Sh/GS наклоны спектров на МГД-масштабах в МСЛ соответствуют измеряемому в СВ, причем как для случаев колмогоровского скейлинга, так и для случаев отклонения

от него в СВ. Для прочих событий связи между наклонами спектров в двух областях не наблюдается.

На кинетических масштабах в среднем спектры флуктуаций в МСЛ имеют больший по модулю наклон, чем в СВ, что характерно для плазмы МСЛ. Наименьшее изменение наклона при входе плазмы в МСЛ наблюдается для событий типа Ejecta/Sh/GS. Наибольшее изменение наклона наблюдается для событий типа Ejecta/Sh/noGS, Ejecta/noSh и Sh. Интересно, что для четырех из пяти событий, относящихся к МС, наблюдается разброс значений наклона в СВ, в то время как в МСЛ показатели наклона близки к  $-8/3$ . Подобное изменение может говорить о том, что каскад турбулентных флуктуаций может разрушаться и формироваться заново за ОЗУВ не только для МГД, как предполагалось в [Huang et al., 2017], но и для кинетических масштабов. Однако однозначно ответить на этот вопрос в рамках данной работы не представляется возможным из-за ограниченной статистики для МС. Для одного из пяти событий наклон на кинетических масштабах близок к  $-4.5$ , что характерно для наблюдения волновых процессов или локальных когерентных структур, например альфвеновских вихрей [Alexandrova et al., 2008].

На рис. 4 представлено сравнение средних значений и стандартных отклонений изменений наклонов спектров флуктуаций в области ОЗУВ на МГД (а) и кинетических (б) масштабах для рассмотренных типов ICME. Изменение наклона определяется как  $P_{1,2} = (P_{1,2}^{\text{MSL}} - P_{1,2}^{\text{CB}}) / P_{1,2}^{\text{CB}}$ , где индексы 1 и 2 относятся к МГД и кинетическим масштабам соответственно. В случае более плоских спектров флуктуаций, характерных для МСЛ,  $\Delta P < 0$ , в случае укрупнения спектра флуктуаций в области ОЗУВ  $\Delta P > 0$ . Несмотря на большие стандартные отклонения значений видно, что разные типы ICME имеют свои особенности в изменении скейлинга за ОЗУВ. Наиболее значимое различие наблюдается для событий Ejecta, приводящих и не приводящих к магнитосферным возмущениям. В первом случае наблюдается наименьшее изменение скейлинга спектров флуктуаций как на МГД, так и на кинетических масштабах. Во втором случае для большинства событий наблюдается усиление волновой активности и темпов диссипации энергии в МСЛ.

Зависимость мощности флуктуаций вектора магнитного поля в МСЛ от соответствующей мощности в СВ, измеренной на МГД-масштабах, представлена на рис. 5, а. Средние значения и стандартные отклонения изменения мощности спектров  $\log(PSD_{\text{MSL}} / PSD_{\text{CB}})$  приведены на рис. 4, в. Видно, что для МС и Ejecta/Sh/GS пересечение ОЗУВ сопровождается увеличением мощности флуктуаций на два порядка. Для Sheath и Ejecta/Sh/noGS характерно менее выраженное усиление флуктуаций — на 1–2 порядка. Наиболее значительное усиление флуктуаций, в ряде случаев более трех порядков, наблюдается в периоды Ejecta/noSh.

Одним из основных отличий плазмы МСЛ от плазмы невозмущенного СВ является усиление доли компрессионной компоненты флуктуаций за ОЗУВ.

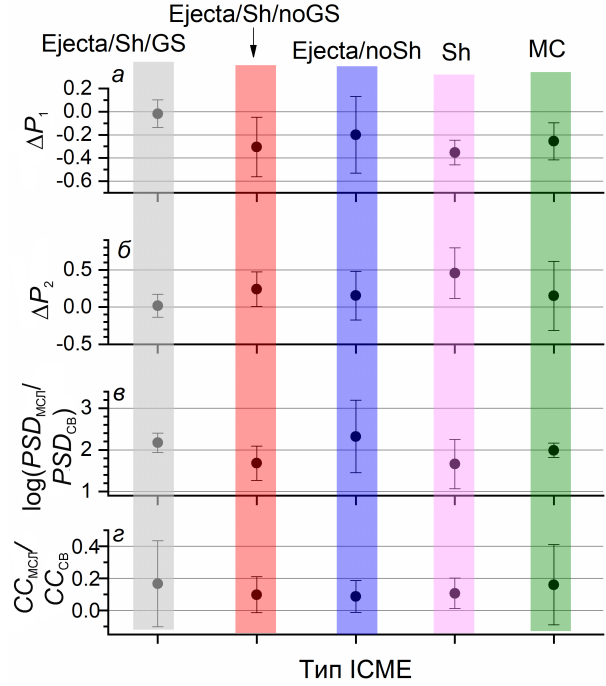


Рис. 4. Среднее значение и стандартное отклонение изменения наклонов  $P_1$  (а) и  $P_2$  (б), а также изменения мощности спектров флуктуаций на МГД-масштабах (в) и коэффициента компрессии (г) для ICME разных типов

На рис. 5, б приведено сравнение коэффициентов компрессии в СВ и МСЛ для всех рассматриваемых типов интервалов. Средние значения и стандартные отклонения для разных типов ICME приведены на рис. 4, г. Хорошо видно, что в СВ мощность компрессионной компоненты флуктуаций магнитного поля для подавляющего большинства событий в десять раз меньше мощности альфвеновской компоненты ( $CC_{\text{CB}} < 0.1$ ), что характерно для СВ. При этом в среднем доля флуктуаций сжатия выше для областей Sheath, что закономерно для областей сжатой плазмы. Существенной разницы в коэффициенте сжатия для интервалов Ejecta различных типов не наблюдается. В МСЛ в среднем коэффициент  $CC_{\text{MSL}}$  выше, чем в СВ, доля сжимаемой компоненты, как правило, сопоставима с долей альфвеновской. Четкой связи между сжимаемостью флуктуаций в СВ и МСЛ не наблюдается: в среднем сжимаемость увеличивается на один порядок для всех рассмотренных типов ICME. Таким образом, усиление сжимаемости, по-видимому, не играет роли в различии динамики турбулентного каскада за ОЗУВ для разных типов ICME и в различии геомагнитного отклика на них.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В настоящей работе на основе анализа одновременных измерений характеристик турбулентности в солнечном ветре и в дневном магнитослое проанализировано различие в формировании турбулентного каскада за околоземной ударной волной для 15 событий ICME различных типов и разной степени геоэффективности. Показано следующее:

1. Наиболее выраженное изменение скейлинга турбулентного каскада на ОЗУВ как на МГД, так и на кинетическом масштабах наблюдается в периоды



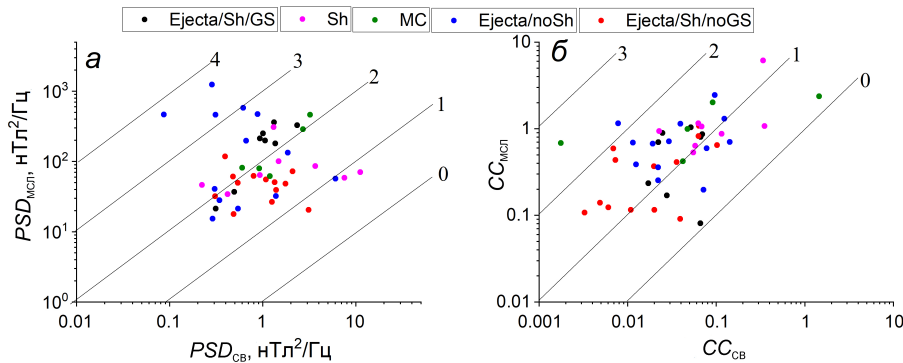


Рис. 5. Зависимость мощности флуктуаций вектора магнитного поля в МСЛ от соответствующей мощности в СВ для МГД-масштабов (а); зависимость коэффициента компрессии в МСЛ от коэффициента компрессии в СВ для ICME разных типов (б); линиями обозначено увеличение мощности (а) и степени компрессии (б) в  $10^n$  раз, показатель  $n$  приведен рядом с соответствующей линией

ICME типа Ejecta, которые не сопровождаются существенным откликом магнитосферы ( $Dst > -30$  нТл); при этом несущественно, наблюдается или не наблюдается перед ICME область сжатия Sheath; в указанных событиях за ОЗУВ наблюдается значительное усиление волновой активности на инерционных масштабах, а также увеличение темпа диссипации энергии.

2. Наименее выраженное изменение скейлинга турбулентного каскада на ОЗУВ как на МГД, так и на кинетическом масштабах характерно для областей Ejecta с Sheath перед ними, вызывающих значительные возмущения магнитосферы ( $Dst < -30$  нТл).

3. События типа Ejecta без области сжатия Sheath сопровождаются наибольшим усилением флуктуаций МГД-масштаба на ОЗУВ, которое может достигать четырех порядков.

4. Степень сжимаемости флуктуаций изменяется в среднем на один порядок за ОЗУВ вне зависимости от типа ICME и для различных откликов магнитосферы на ICME.

Полученные данные об изменении скейлинга флуктуаций при входе плазмы в МСЛ в среднем соответствуют полученным ранее в статистических исследованиях [Czaykowska et al., 2001; Huang et al., 2017; Rakhmanova et al., 2024a, b]: наблюдается отклонение скейлинга от колмогоровского на МГД-масштабах и укрупнение спектров на кинетических масштабах. Однако в настоящей работе показано важное различие между событиями, имевшими одинаковый тип, т. е. источник на Солнце, но сопровождавшимися различным откликом магнитосферы.

Следует отметить, что геоэффективность ICME типа Ejecta имеет хорошо объяснимую связь с  $B_z$ -компонентой магнитного поля (см. таблицу): для событий, вызывающих существенный магнитосферный отклик, характерна выраженная южная ориентация межпланетного магнитного поля. Однако, согласно статистическому анализу [Rakhmanova et al., 2024a], среднее значение  $B_z$ -компоненты явно не влияет на изменение характеристик турбулентности на ОЗУВ. В настоящей работе были проверены также связи между изменениями параметров турбулентности

на ОЗУВ и параметрами плазмы и магнитного поля СВ, в частности скоростью плазмы, и не было обнаружено никаких зависимостей в рамках событий типа ICME.

Значительное усиление мощности флуктуаций на МГД-масштабах в периоды событий Ejecta, не имевших перед собой области сжатия и не сопровождавшихся значительным откликом магнитосферы, а также частое наблюдение выраженных волновых процессов в эти периоды свидетельствуют о том, что энергия флуктуаций, пришедших из СВ, была преобразована в МГД-волны. Усиление диссипации (укрупнение спектров флуктуаций на кинетических масштабах), характерное для этих периодов, также свидетельствует о появлении в каскаде избыточной энергии, которая перераспределяется от больших масштабов к меньшим посредством каскада. Усиление волновых процессов наблюдается и в периоды Ejecta с Sheath, не приведших к существенным магнитосферным возмущениям, несмотря на указания о большей геоэффективности таких событий [Yermolaev et al., 2015]. Подобные особенности в формировании турбулентного каскада за ОЗУВ свидетельствуют о том, что в геоэффективность различных явлений в межпланетной среде вклад вносят не только глобальные процессы пересоединения на магнитопаузе, которые определяются направлением межпланетного магнитного поля и динамическим давлением СВ и часто указываются в качестве доминирующего процесса в солнечно-земных связях, но и процессы перекачки энергии по каскаду (например, [D'Amicis et al., 2020]) и их изменения в области ОЗУВ, которые могут носить специфический характер для потоков СВ разных типов. Этот вклад требует более детального исследования для построения более точных моделей солнечно-земных связей.

Работа была выполнена в рамках госзадания ИКИ РАН по теме «ПЛАЗМА».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. *Космические исследования*. 2009, т. 47, № 2, с. 99–113.

- Рахманова Л.С., Рязанцева М.О., Застенкер Г.Н., Веригин М.И. Влияние магнитопаузы и головной ударной волны на характеристики турбулентности плазмы в магнитослое Земли. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2018, т. 58, № 6, с. 749–758.
- Рахманова Л.С., Хохлачев А.А., Рязанцева М.О. и др. Развитие турбулентности за околоземной ударной волной в периоды спокойного и возмущенного солнечного ветра. *Солнечно-земная физика*. 2024, т. 10, № 2, с. 15–28. DOI: [10.12737/szf-102202402](https://doi.org/10.12737/szf-102202402) / Rakhmanova L., Khokhlachev A., Riazantseva M., et al. Turbulence development behind the bow shock during disturbed and undisturbed solar wind. *Sol.-Terr. Phys.* 2024, vol. 10, no. 2, pp. 13–25. DOI: [10.12737/stp-102202402](https://doi.org/10.12737/stp-102202402).
- Рязанцева М.О., Рахманова Л.С., Застенкер Г.Н. и др. Мелкомасштабные флуктуации плазмы солнечного ветра в быстрых и медленных потоках. *Космические исследования*. 2019, т. 57, № 6, с. 451–460.
- Рязанцева М.О., Рахманова Л.С., Застенкер Г.Н. и др. Характеристики турбулентного потока солнечного ветра в областях компрессии плазмы. *Космические исследования*. 2020, т. 58, № 6, с. 503–512.
- Alexandrova O., Lacombe C., Mangeney A. Spectra and anisotropy of magnetic fluctuations in the Earth's magnetosheath: Cluster observations. *Ann. Geophys.* 2008, vol. 26, iss. 11, pp. 3585–3596. DOI: [10.5194/angeo-26-3585-2008](https://doi.org/10.5194/angeo-26-3585-2008).
- Auster H.U., Glassmeier K.H., Magnes W., et al. The THEMIS fluxgate magnetometer. *Space Sci. Rev.* 2008, vol. 141, pp. 235–264. DOI: [10.1007/s11214-008-9365-9](https://doi.org/10.1007/s11214-008-9365-9).
- Balogh A., Carr C.M., Acuna M.H., et al. The Cluster Magnetic Field Investigation: Overview of inflight performance and initial results. *Ann. Geophys.* 2001, vol. 19, pp. 1207–1217. DOI: [10.5194/angeo-19-1207-2001](https://doi.org/10.5194/angeo-19-1207-2001).
- Boldyrev S., Perez J.C. Spectrum of kinetic Alfvén turbulence. *Astrophys. J. Lett.* 2012, vol. 758, no. 2, 5 p. DOI: [10.1088/2041-8448/205/2/L44](https://doi.org/10.1088/2041-8448/205/2/L44).
- Borovsky J.E., Denton M.H. The differences between CME-driven storms and CIR-driven storms. *J. Geophys. Res.* 2006, vol. 111, A07S08.
- Boynton R.J., Balikhin M.A., Billings S.A., et al. Data derived NARMAX Dst model. *Ann. Geophys.* 2012, vol. 29, iss. 6, pp. 965–971. DOI: [10.5194/angeo-29-965-2011](https://doi.org/10.5194/angeo-29-965-2011).
- Bruno R., Trenchi L., Telloni D. Spectral slope variation at proton scales from fast to slow solar wind. *Astrophys. J. Lett.* 2014, vol. 793, L15.
- Burlaga L.F. Magnetic clouds. *Physics of the Inner Heliosphere*: vol. 2. Eds R. Schwenn and E. Marsch. Springer-Verlag, 1991, p. 1. DOI: [10.1007/978-3-642-75364-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-75364-0_1).
- Czaykowska A., Bauer T.M., Treumann R.A., Baumjohann W. Magnetic field fluctuations across the Earth's bow shock. *Ann. Geophys.* 2001, vol. 19, iss. 3, pp. 275–287. DOI: [10.5194/angeo-19-275-2001](https://doi.org/10.5194/angeo-19-275-2001).
- D'Amicis R., Telloni D., Bruno R. The effect of solar-wind turbulence on magnetospheric activity. *Front. Phys.* 2020, vol. 8, 604857. DOI: [10.3389/fphy.2020.604857](https://doi.org/10.3389/fphy.2020.604857).
- Ervin T., Jaffarove K., Badman S.T., et al. Characteristics and source regions of slow Alfvénic solar wind observed by Parker Solar Probe. *Astrophys. J.* 2024, vol. 975, no. 2, 156. DOI: [10.3847/1538-4357/ad7d00](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad7d00).
- Greenstadt E.W. Binary index for assessing local bow shock obliquity. *J. Geophys. Res.* 1972, vol. 77, pp. 5467–5479. DOI: [10.1029/JA077i028p05467](https://doi.org/10.1029/JA077i028p05467).
- Huang S.Y., Hadid L.Z., Sahraoui F., et al. On the existence of the Kolmogorov inertial range in the terrestrial magnetosheath turbulence. *Astrophys. J. Lett.* 2017, vol. 836, no. 1, L10. DOI: [10.3847/2041-8213/836/1/L10](https://doi.org/10.3847/2041-8213/836/1/L10).
- Karimabadi H., Roytershteyn V., Vu H.X., et al. The link between shocks, turbulence, and magnetic reconnection in collisionless plasmas. *Phys. Plasmas*. 2014, vol. 21, 062308. DOI: [10.1063/1.4882875](https://doi.org/10.1063/1.4882875).
- Kilpua E., Koskinen H.E.J., Pulkkinen T.I. Coronal mass ejections and their sheath regions in interplanetary space. *Living Rev. Solar Phys.* 2017, vol. 14, article number 5. DOI: [10.1007/s41116-017-0009-6](https://doi.org/10.1007/s41116-017-0009-6).
- Lacombe C., Belmont G. Waves in the Earth's magnetosheath: observations and interpretations. *Adv. Space Res.* 1995, vol. 15, pp. 329–340. DOI: [10.1016/0273-1177\(94\)00113-F](https://doi.org/10.1016/0273-1177(94)00113-F).
- Lepping R.P., Acuña M.H., Burlaga L.F., et al. The WIND Magnetic Field Investigation. *Space Sci. Rev.* 1995, vol. 71, pp. 207–229. DOI: [10.1007/BF00751330](https://doi.org/10.1007/BF00751330).
- McFadden J.P., Carlson C.W., Larson D., et al. The THEMIS ESA plasma instrument and in-flight calibration. *Space Sci. Rev.* 2008, vol. 141, pp. 277–302. DOI: [10.1007/s11214-008-9440-2](https://doi.org/10.1007/s11214-008-9440-2).
- Ogilvie K.W., Chornay D.J., Fritzenreiter R.J., et al. SWE, a comprehensive plasma instrument for the WIND spacecraft. *Space Sci. Rev.* 1995, vol. 71, pp. 55–77. DOI: [10.1007/BF00751326](https://doi.org/10.1007/BF00751326).
- Pallochia G., Amata E., Consolini G., et al. Geomagnetic Dst index forecast based on IMF data only. *Ann. Geophys.* 2006, vol. 24, pp. 989–999. DOI: [10.5194/angeo-24-989-2006](https://doi.org/10.5194/angeo-24-989-2006).
- Palmroth M., Ganse U., Pfau-Kempf Y., et al. Vlasov methods in space physics and astrophysics. *Living Reviews in Computational Astrophysics*. 2018, vol. 4, article number 1. DOI: [10.1007/s41115-018-0003-2](https://doi.org/10.1007/s41115-018-0003-2).
- Podladchikova T.V., Petrukovich A.A. Extended geomagnetic storm forecast ahead of available solar wind measurements. *Space Weather*. 2012, vol. 10, S07001. DOI: [10.1029/2012SW000786](https://doi.org/10.1029/2012SW000786).
- Pollock C., Moore T., Jacques A., et al. Fast Plasma Investigation for Magnetospheric Multiscale. *Space Sci. Rev.* 2016, vol. 199, pp. 331–406. DOI: [10.1007/s11214-016-0245-4](https://doi.org/10.1007/s11214-016-0245-4).
- Pulinets M.S., Antonova E.E., Riazantseva M.O., et al. Comparison of the magnetic field before the subsolar magnetopause with the magnetic field in the solar wind before the bow shock. *Adv. Space Res.* 2014, vol. 54, pp. 604–616. DOI: [10.1016/j.asr.2014.04.023](https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.04.023).
- 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.: Space Phys.* 2018, vol. 123, pp. 5300–5314. DOI: [10.1029/2018JA025179](https://doi.org/10.1029/2018JA025179).
- Rakhmanova L., Riazantseva M., Zastenker G. Plasma and magnetic field turbulence in the Earth's magnetosheath at ion scales. *Front. Astron. Space Sci.* 2021, vol. 7, 616635. DOI: [10.3389/fspas.2020.616635](https://doi.org/10.3389/fspas.2020.616635).
- Rakhmanova L., Khokhlachev A., Riazantseva M., et al. Modification of the turbulence properties at the bow shock: Statistical results. *Front. Astron. Space Sci.* 2024a, vol. 11, 1379664. DOI: [10.3389/fspas.2024.1379664](https://doi.org/10.3389/fspas.2024.1379664).
- Rakhmanova L., Khokhlachev A., Riazantseva M., et al. Changes in and recovery of the turbulence properties in the magnetosheath for different solar wind streams. *Universe*. 2024b, vol. 10, no. 5, 194. DOI: [10.3390/universe10050194](https://doi.org/10.3390/universe10050194).
- Rème H., Aoustin C., Bosqued J.M., et al. First multispacecraft ion measurements in and near the Earth's magnetosphere with the identical Cluster Ion Spectrometry (CIS) experiment. *Ann. Geophys.* 2001, vol. 19, pp. 1303–1354. DOI: [10.5194/angeo-19-1303-2001](https://doi.org/10.5194/angeo-19-1303-2001).
- Riazantseva M.O., Treves T.V., Khabarova O., et al. Linking turbulent interplanetary magnetic field fluctuations and current sheets. *Universe*. 2024, vol. 10, no. 11, 417. DOI: [10.3390/universe10110417](https://doi.org/10.3390/universe10110417).
- Richardson I.G., Cane H.V. Near-Earth interplanetary coronal mass ejections during solar cycle 23 (1996–2009): Catalog and summary of properties. *Solar Phys.* 2010, vol. 264, pp. 189–237. DOI: [10.1007/s11207-010-9568-6](https://doi.org/10.1007/s11207-010-9568-6).
- Russell C.T., Anderson B.J., Baumjohann W., et al. The Magnetospheric Multiscale Magnetometers. *Space Sci. Rev.*

- 2016, vol. 199, pp. 189–256. DOI: [10.1007/s11214-014-0057-3](https://doi.org/10.1007/s11214-014-0057-3).
- Schekochihin A.A., Cowley S.C., Dorland W., et al. Astrophysical gyrokinetics: kinetic and fluid turbulent cascades in magnetized weakly collisional plasmas. *Astrophys. J. Suppl.* 2009, vol. 182, pp. 310–377. DOI: [10.1088/0067-0049/182/1/310](https://doi.org/10.1088/0067-0049/182/1/310).
- Šafránková J., Hayosh M., Gutinska O., et al. Reliability of prediction of the magnetosheath  $B_z$  component from the interplanetary magnetic field observations. *J. Geophys. Res.* 2009, vol. 114, A12213. DOI: [10.1029/2009A014552](https://doi.org/10.1029/2009A014552).
- Sahraoui F., Hadid L., Huang S. Magnetohydrodynamic and kinetic scale turbulence in the near-Earth space plasmas: a (short) biased review. *Rev. Mod. Phys.* 2020, vol. 4, article number 4. DOI: [10.1007/s41614-020-0040-2](https://doi.org/10.1007/s41614-020-0040-2).
- Schwartz S.J., Burgess D., Moses J.J. Low-frequency waves in the Earth's magnetosheath: Present status. *Ann. Geophys.* 1996, vol. 14, pp. 1134–1150. DOI: [10.1007/s00585-996-1134-z](https://doi.org/10.1007/s00585-996-1134-z).
- 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.* 2005, vol. 53, pp. 95–102. DOI: [10.1016/j.pss.2004.09.033](https://doi.org/10.1016/j.pss.2004.09.033).
- Spreiter J.R., Summers A.L., Alksne A.Y. Hydromagnetic flow around the magnetosphere. *Planet. Space Sci.* 1966, vol. 14, pp. 223–253.
- Turc L., Fontaine D., Escoubet C.P., et al. Statistical study of the alteration of the magnetic structure of magnetic clouds in the Earth's magnetosheath. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017, vol. 122, pp. 2956–2972. DOI: [10.1002/2016JA023654](https://doi.org/10.1002/2016JA023654).
- Tóth G., Sokolov I., Gombosi T., et al. Space Weather Modeling Framework: A new tool for the space science community. *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 110, A12226. DOI: [10.1029/2005JA011126](https://doi.org/10.1029/2005JA011126).
- Woodham L.D., Wicks R.T., Verscharen D., Owen C.J. The role of proton cyclotron resonance as a dissipation mechanism in solar wind turbulence: A statistical study at ion-kinetic scales. *Astrophys. J.* 2018, vol. 856, no. 1, 49. DOI: [10.3847/1538-4357/aab03d](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aab03d).
- Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Nikolaeva N.S., Yermolaev M.Y. Dynamics of large-scale solar-wind streams obtained by the double superposed epoch analysis. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015, vol. 120, pp. 7094–7106. DOI: [10.1002/2015JA021274](https://doi.org/10.1002/2015JA021274).
- Zimbardo G., Greco A., Sorriso-Valvo L., et al. Magnetic turbulence in the geospace environment. *Space Sci. Rev.* 2010, vol. 156, pp. 89–134. DOI: [10.1007/s11214-010-9692-5](https://doi.org/10.1007/s11214-010-9692-5).  
URL: <http://iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/> (дата обращения 8 апреля 2025 г.).  
URL: [https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/sp\\_phys/](https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/sp_phys/) (дата обращения 8 апреля 2025 г.).  
URL: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstidir/> (дата обращения 8 апреля 2025 г.).

Статья подготовлена по материалам Двадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 10–14 февраля 2025 г., Институт космических исследований РАН, Москва, Russia.

Как цитировать эту статью:

Рахманова Л.С., Рязанцева М.О., Хохлачев А.А., Ермолаев Ю.И., Застенкер Г.Н. Особенности формирования турбулентного каскада в магнитослое в периоды ICME. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 3, с. 16–25. DOI: [10.12737/szf-113202502](https://doi.org/10.12737/szf-113202502).