
АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ФЛУКТУАЦИЙ ВЕЛИЧИНЫ ПОТОКА ПЛАЗМЫ И МОДУЛЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОБРАТНЫХ УДАРНЫХ ВОЛНАХ

SPECTRAL PROPERTIES OF SOLAR WIND PLASMA FLUX AND MAGNETIC FIELD FLUCTUATIONS ACROSS FAST REVERSE INTERPLANETARY SHOCKS

О.В. Сапунова

*Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, sapunova_olga@cosmos.ru*

Н.Л. Бородкова

*Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, nlbor@mail.ru*

Г.Н. Застенкер

*Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, gzastenk@iki.rssi.ru*

O.V. Sapunova

*Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, sapunova_olga@cosmos.ru*

N.L. Borodkova

*Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, nlbor@mail.ru*

G.N. Zastenker

*Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, gzastenk@iki.rssi.ru*

Аннотация. Проанализированы спектры колебаний значений потока плазмы солнечного ветра и модуля магнитного поля вблизи фронта быстрой обратной ударной волны по данным БМСВ (Быстрый монитор солнечного ветра) на борту спутника СПЕКТР-Р. Временное разрешение прибора позволило изучить колебания потока плазмы вплоть до частоты 16 Гц. Данные по магнитному полю были взяты в основном из базы спутника WIND, для которого частота исследуемых колебаний составляла до 5.5 Гц.

Показано, что наклон спектров колебаний потока солнечного ветра на МГД-масштабах близок к наклону спектра флуктуаций магнитного поля в возмущенной области. На кинетических масштабах различие может быть значительным. Для области перед фронтом разница наклона спектра может быть достаточно велика как в МГД, так и в кинетической области.

Частота излома спектра потока лежит в диапазоне 0.6–1.3 Гц, что соответствует инерционной длине протона. Однако в ряде событий форма спектра указывает на влияние частоты, соотносящейся с гирорадиусом протона, 0.05–0.15 Гц. Излом спектра мощности флуктуаций магнитного поля также чаще лежит в области 0.7–1.2 Гц. При этом наклон МГД-части спектра меняется мало, однако в кинетической части несколько возрастает при переходе к возмущенной области.

Ключевые слова: солнечный ветер, межпланетные ударные волны, флуктуации.

Abstract. We have analyzed spectra of fluctuations in the solar wind plasma flux and the magnetic field magnitude near the front of a fast reverse shocks, using data from the BMSW device (Bright Monitor of Solar Wind) operating on the SPEKTR-R satellite. Its time resolution made it possible to study plasma flux fluctuations up to a frequency of 16 Hz. Magnetic field data was taken mainly from the WIND satellite, for which the frequency of the fluctuations considered was up to 5.5 Hz.

The slope of the spectra of the solar wind flux fluctuations on MHD scales has been shown to be close to the slope of the spectrum of magnetic field fluctuations in the disturbed region. On kinetic scales, the difference can be significant. For the region ahead of the front, the difference in the slope of the spectrum can be quite large both in the MHD and in the kinetic region.

The frequency of the break of the flux spectrum ranges from 0.6 to 1.3 Hz, which corresponds to the scale of the proton inertial length. In a number of events, however, the shape of the spectrum indicates the influence of the proton gyroradius frequency, which is usually 0.05–0.15 Hz. The break in the power spectrum of magnetic field fluctuations also more often ranges from 0.7 to 1.2 Hz. In this case, the slope of the MHD part of the spectrum changes little, but in the kinetic part it increases slightly when moving to the disturbed region.

Keywords: solar wind, interplanetary shocks, fluctuations.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечный ветер (СВ) является естественной лабораторией для изучения плазменной турбулентности [Bruno, Carbone, 2013; Kolmogorov, 1962; Leamon et al., 2000]. Считается, что в СВ энергия системы содержится в структурах с масштабами более 10^6 км и передается на меньшие масштабы через каскад турбулентных флуктуаций. Кинетические процессы

начинают играть важную роль на масштабах порядка гирорадиуса протона ($\sim 10^3$ км), происходит диссипация энергии и, как следствие, нагрев плазмы [Matthaeus et al., 2016]. Особого внимания заслуживает изменение плазменной турбулентности при пересечении магнитогидродинамических (МГД) разрывов, в частности межпланетных ударных волн (МУВ), которые образуются при нелинейном увеличе-

нии крутизны волны и могут быть разделены (рис. 1) на быстрые прямые (FF), быстрые обратные (FR), медленные прямые (SF) и медленные обратные (SR) [Oliveira, 2017]. Источниками МУВ первых двух типов обычно являются корональные выбросы массы и области сжатия на границе медленного и быстрого СВ. Волны на переднем крае магнитного облака и области сжатия будут прямыми (FF), а на заднем крае — обратными (FR), распространяющимися в сторону Солнца [Pitňa et al., 2021].

Когда крупномасштабная плазменная турбулентность (на масштабах больше ионного гирорадиуса) развивается в результате прохождения МУВ типа FF, ее мощность увеличивается, а форма спектров мощности (Power Spectral Density, PSD) подобна для возмущенной и невозмущенной областей СВ [Pitňa et al., 2021]. Аналогичные результаты, указывающие на то, что мощность флуктуаций магнитного поля увеличивается при переходе от невозмущенной к возмущенной области потока СВ при пересечении фронта быстрой прямой МУВ, представлены в [Zhao et al., 2021]. Ударные волны других типов рассматриваются значительно реже [Park et al., 2023].

Для выявления различия между типами ударных волн мы расширили статистику, включив в исследование быстрые прямые и быстрые обратные ударные волны. Мы вычислили коэффициенты наклона спектра мощности флуктуаций как в возмущенной, так и невозмущенной области СВ на основе данных по магнитному полю и по потоку плазмы отдельно для МГД-области спектра и переходной области.

Исследования турбулентности с использованием данных БМСВ по потоку плазмы проводились в работах [Šafránková et al., 2015, 2016]. Одним из исследуемых параметров было положение излома спектра, которое показывает переход от МГД-масштабов к кинетическим и определяется процессами, ответственными за диссипацию энергии в плазме. В зависимости от того, какой процесс превалирует и является ведущим для данного набора параметров, положение излома может соответствовать, например, инерционной длине протона L (флуктуации определяются передачей энергии между тонкими токовыми слоями [Leamon et al., 2000; Smith et al., 2001]) или гирорадиусу протона R (флуктуации определяются каскадом альфвеновских флуктуаций [Howes et al., 2008; Schekochihin et al., 2009]). Частота, определяемая инерционной длиной иона:

$$F_L = V/2\pi L, \quad (1)$$

где V — потоковая скорость плазмы; $L = c/\omega_i$ — инерционная длина иона, где $\omega_i = (4\pi n_i/m_i)^{1/2}$ — плазменная частота иона.

Мы делили спектр флуктуаций на частоте, соответствующей инерционной длине протона. Однако частота, соотносящаяся с гирорадиусом протона, также указывается.

1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

В работе использовались данные БМСВ (Быстрый монитор солнечного ветра) спутника СПЕКТР-Р

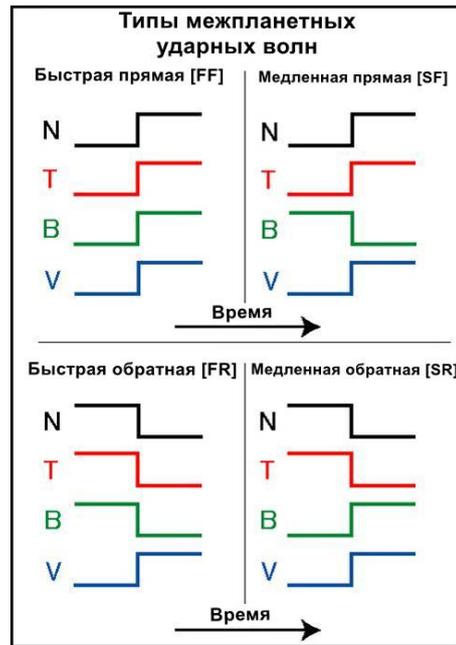


Рис. 1. Типы межпланетных ударных волн и соответствующее им поведение концентрации плазмы (N), температуры (T), модуля магнитного поля (B) и скорости солнечного ветра (V); ход параметров представлен по времени регистрации на космическом аппарате

[Zastenker et al., 2013; Šafránková et al., 2013]. За 2011–2019 гг. было зарегистрировано 55 быстрых прямых и 14 быстрых обратных МУВ. Для всех событий были определены скорость, температура протонов и концентрации протонов и ионов и построены спектры флуктуаций потока протонов и магнитного поля. Модуль и компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) брались по данным спутника WIND. Скорость распространения ударной волны V_{IP} определялась геометрическим методом по данным четырех спутников.

Пример регистрации быстрой прямой МУВ приведен на рис. 2. В 14:19:05 UT 14.07.2014 на спутнике СПЕКТР-Р был зарегистрирован скачок параметров плазмы СВ. В невозмущенной области концентрация ионов составляла $\sim 37 \text{ см}^{-3}$, температура протонов — примерно 1.5 эВ, а скорость потока плазмы $V_x = -332 \text{ км/с}$ (в координатах GSE). Модуль ММП составил 8 нТл, при этом основной вклад вносила компонента B_z . После прохождения фронта МУВ концентрация увеличилась примерно в два раза, до 54 см^{-3} , а температура достигла 2 эВ (не считая колебаний сразу за фронтом, где температура могла быть и 2.5 эВ). Скачок скорости был невелик и составил около 26 км/с, что ниже среднего значения для таких событий. Модуль магнитного поля увеличился в 1.5 раза — до 12 нТл. Все параметры возросли при пересечении фронта МУВ.

Другая картина наблюдается при прохождении быстрой обратной ударной волны. Как видно на рис. 1, в случае обратной ударной волны все параметры уменьшаются, за исключением скорости СВ. Такое событие представлено на рис. 3.

Событие, классифицированное нами как обратная ударная волна, было зарегистрировано в 15:16:44 UT 08.04.2017. Концентрация протонов СВ упала с 6.7

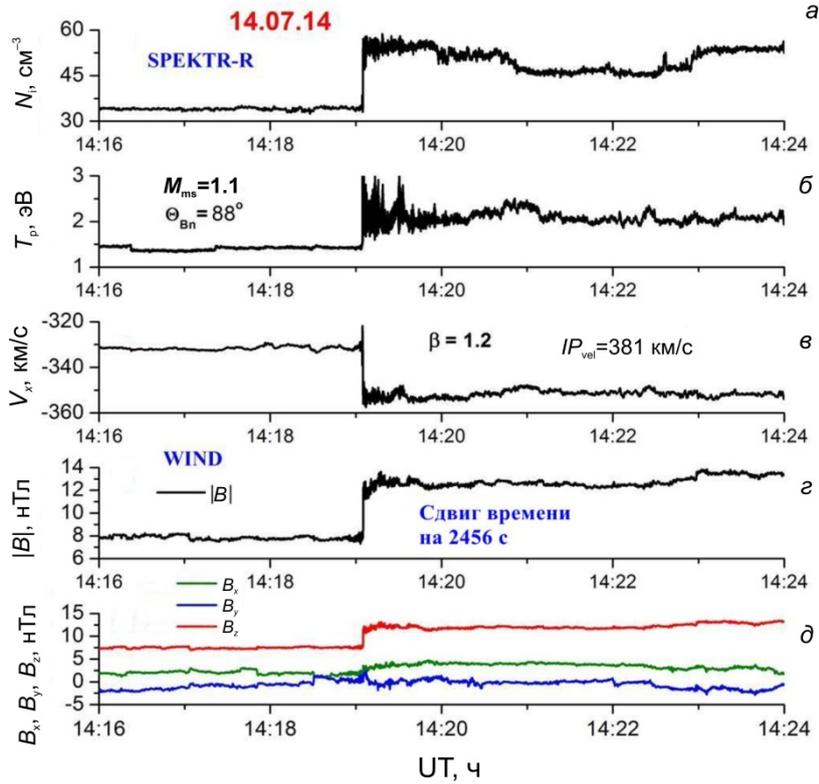


Рис. 2. Временной ход при прохождении быстрой прямой МУВ 14.07.2014: *a* — концентрации ионов; *б* — температуры протонов; *в* — скорость V_x потока плазмы; *г* — модуль ММП; *д* — компонент ММП (в координатах GSE). Для модуля и компонент магнитного поля время сдвинуто на 2456 с для синхронизации со спутником СПЕКТР-Р

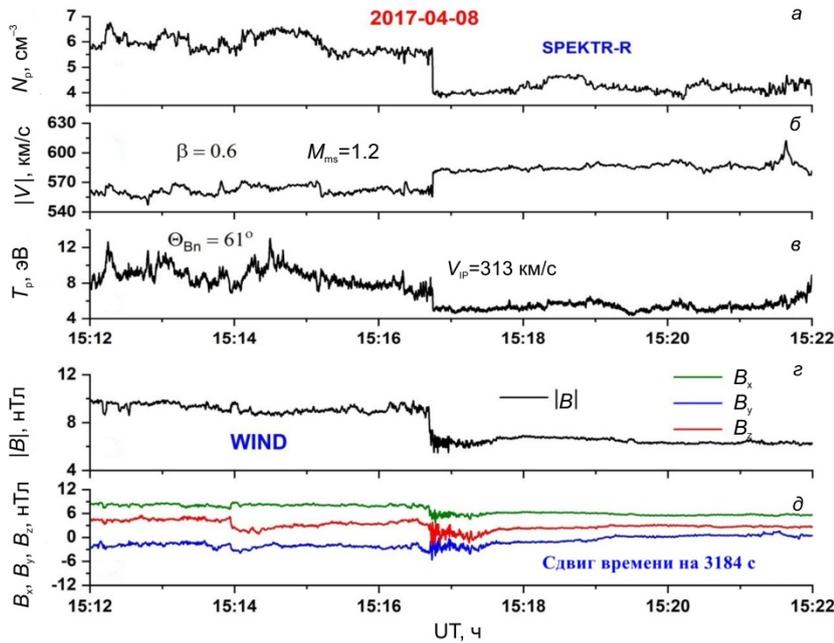


Рис. 3. Временной ход при прохождении быстрой обратной МУВ 08.04.2017: *a* — концентрации протонов; *б* — модуля скорости потока плазмы; *в* — температуры протонов; *г* — модуля ММП; *д* — компонент ММП (в координатах GSE). Для модуля и компонент магнитного поля время сдвинуто на 3184 с для синхронизации со спутником СПЕКТР-Р

до 4 cm^{-3} , температура — с 7 до 5 эВ, а скорость потока увеличилась с 546 до 583 км/с. Модуль магнитного поля также уменьшился с 10 до 6 нТл, в данном событии основной вклад давала компонента B_x . Скорость распространения обратной ударной волны V_{pr} составила 313 км/с, что меньше скорости 381 км/с

прямой ударной волны, зарегистрированной 14.07.2014. Параметр β (отношение газового давления к магнитному) для FR оказался в два раза ниже такового для FF — 1.2. Магнитозвуковое число Маха M_{ms} было мало для обоих событий — 1.2 для FR и 1.1 для FF.

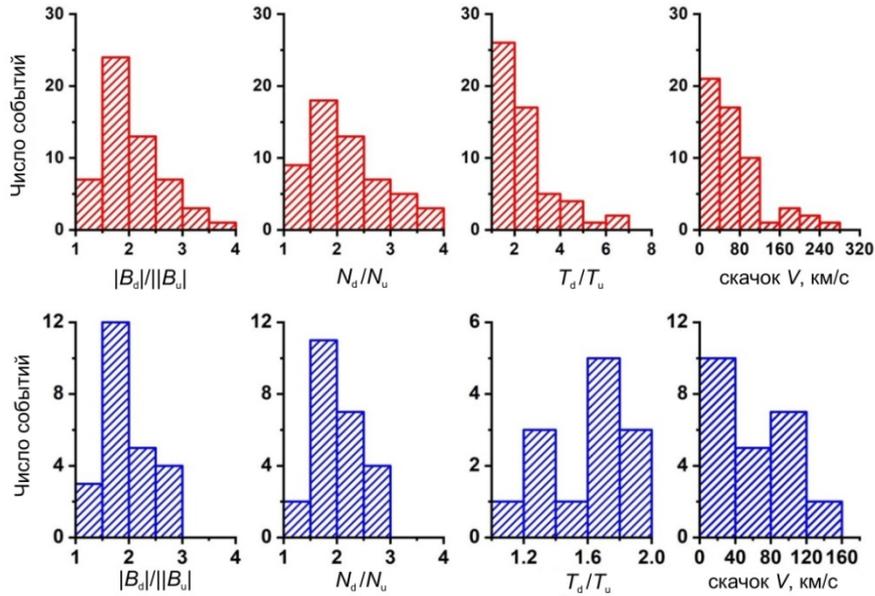


Рис. 4. Изменение параметров плазмы СВ при прохождении МУВ типов FF (красные) и FR (синие). Индексами u и d обозначены области невозмущенного (upstream) и возмущенного (downstream) солнечного ветра

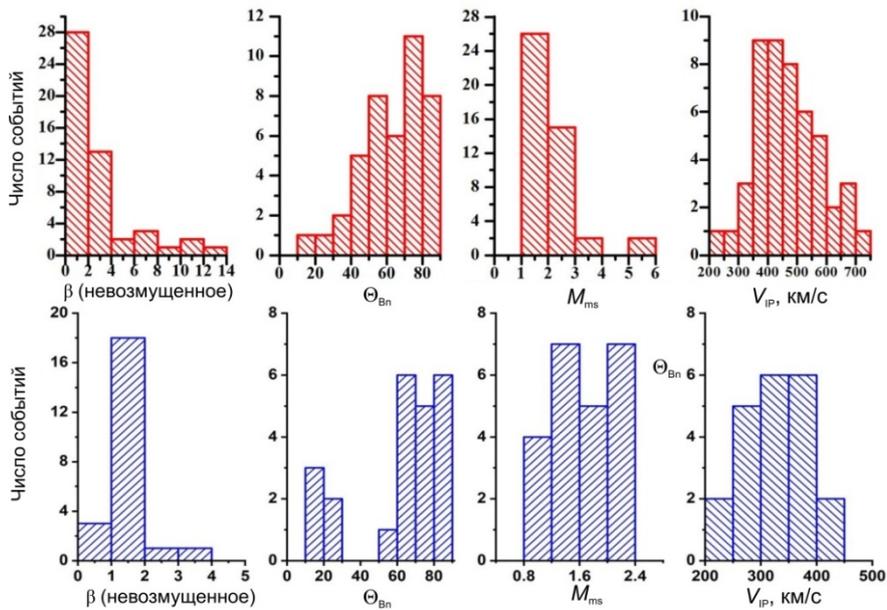


Рис. 5. Классифицирующие параметры плазмы МУВ типов FF (красные) и FR (синие)

Для построения спектров флуктуаций брались интервалы длительностью 40 мин до/после пересечения фронта ударной волны, с отступом от рампа по 5 мин, чтобы исключить влияние тонкой структуры (овершута, андершута, цугов колебаний). Рассматриваемый параметр нормировался на среднее значение для этого интервала.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Статистика изменений параметров солнечного ветра и классифицирующих параметров

Статистика изменений параметров плазмы и магнитного поля, а также классифицирующих парамет-

ров приведена на рис. 4 и 5. На рис. 4 можно видеть, что среднее изменение модуля ММП для обратных МУВ меньше, чем для прямых, хотя и незначительно. Разница в изменении концентрации заметнее — у прямых МУВ она может возрастать в четыре раза, но для обратных МУВ у нас не было случая с $N_d/N_u > 3$. Гораздо интереснее выглядит статистика изменения двух оставшихся параметров — температуры и скачка модуля переносной скорости солнечного ветра. В обратных МУВ температура увеличилась максимум в два раза, в то время как в прямых МУВ — более чем в шесть раз. Скачок переносной скорости для прямых МУВ мог превышать 200 км/с, а для обратных МУВ лишь в двух событиях превысил 120 км/с.

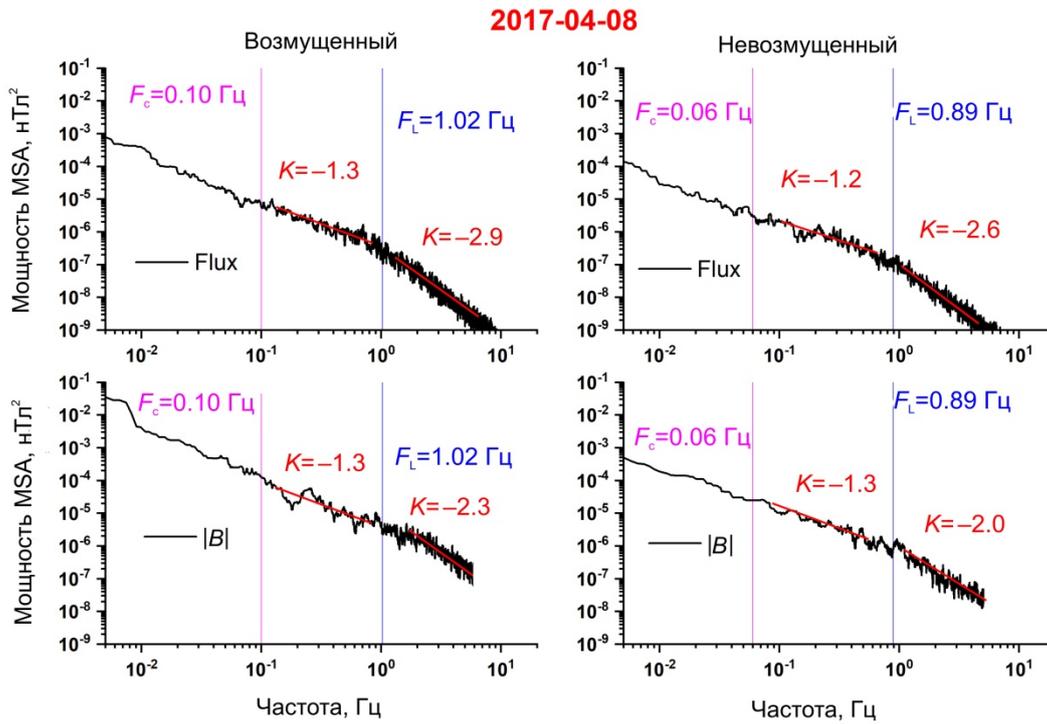


Рис. 6. Спектры флуктуаций потока плазмы (верхние панели) и модуля ММП (нижние панели) для обратной ударной волны в возмущенной (слева) и невозмущенной области (справа): F_C — гирочастота, F_L — частота инерционная; значения K указаны для МГД и переходной областей спектра

На рис. 5 приведена статистика классифицирующих параметров МУВ. Можно отметить некоторое сходство параметра β для обоих типов МУВ — для большей части событий $\beta \leq 2$, хотя в выборке присутствовало достаточное количество событий, для которых значения β лежали в интервале от 2 до 4. Распределения угла $\theta_{\text{Вн}}$ между направлением вектора магнитного поля перед фронтом и нормалью к фронту волны для прямых и обратных МУВ также имеют похожие черты, однако статистики по обратным МУВ не хватило на покрытие всех интервалов. Магнитозвуковое число Маха M_{ms} для обратных МУВ также оказалось в среднем ниже, чем для прямых МУВ, что согласуется с выводами о меньшем скачке скорости на фронтах обратных МУВ, сделанными на основании рис. 4.

2.2. Спектры мощности флуктуаций

На рис. 6 приведены спектры мощности флуктуаций потока плазмы СВ и модуля ММП для обратной МУВ, зарегистрированной 08.04.2017. Спектры представлены для возмущенной и невозмущенной областей СВ (порядок объясняется взаимным расположением этих областей на графике временного хода параметров). Указаны частоты, соответствующие гирорадиусу (F_C) и инерционной длине (F_L) протона.

Видно увеличение мощности флуктуаций при переходе к возмущенной области, что полностью соответствует как теоретическим представлениям, так и предыдущим работам [Rakhmanova et al., 2017]. Частота F_L увеличивается за фронтом данной обратной МУВ, хотя и не так сильно, как в случае для быстрой прямой ударной волны [Sapunova et al.,

2024]: увеличение концентрации в возмущенной области частично компенсируется уменьшением переносной скорости потока плазмы. Исходя из выражения (1), можно было бы ожидать, что F_L будет меньше, поскольку скорость входит в (1) в первой степени, а концентрация — в степени 1/2. Однако уменьшение модуля переносной скорости обычно составляет порядка 10–20 % от значения в невозмущенной области, в то время как концентрация может возрастать в разы.

Коэффициент наклона спектра K в МГД-области почти не изменяется: -1.2 до -1.3 после фронта ударной волны. Значения K для магнитного поля и потока плазмы близки. В то же время в переходной части спектры магнитного поля (K изменяется с -2.0 до -2.3) и потока плазмы (K изменяется с -2.6 до -2.9) несколько укручаются.

Нами были обработаны 55 быстрых прямых и 14 быстрых обратных МУВ. По полученным данным были построены гистограммы распределения частоты изломов спектров флуктуаций потока плазмы СВ и модуля ММП.

2.3. Статистика изменения наклона спектров мощности флуктуаций

На рис. 7 представлена статистика изменения коэффициентов наклона спектра мощности в случае быстрой прямой МУВ. Подобные исследования уже выполнялись рядом авторов [Pitňa et al., 2021; Zhao et al., 2021; Safrankova et al., 2015, 2016] и мы приводим статистику для полноты картины. Разбиение спектра на две части выполняется минимум двумя различными способами — по вычисленной частоте

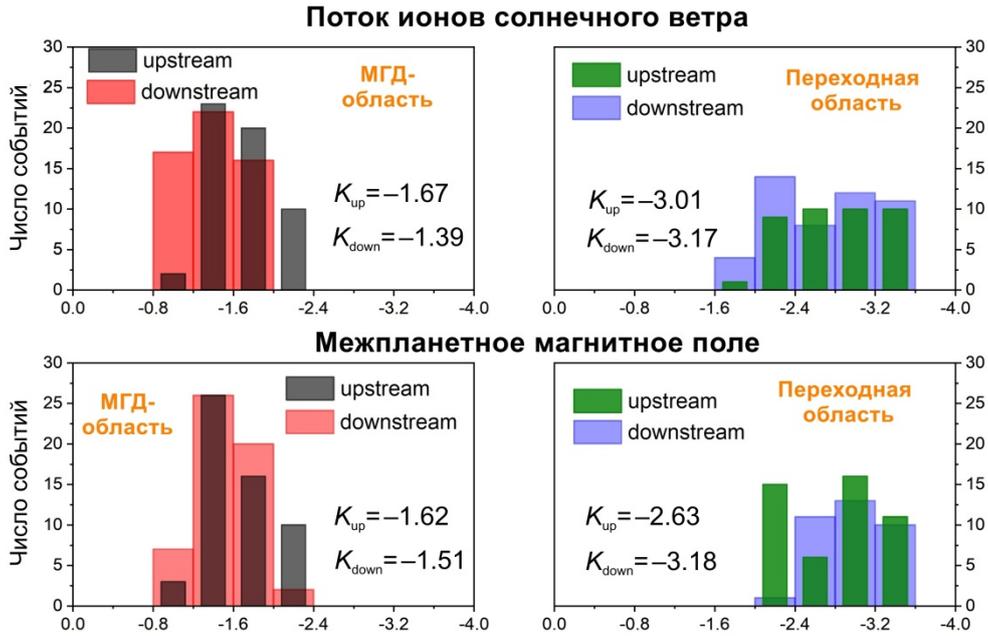


Рис. 7. Гистограммы распределения коэффициентов наклонов спектров флуктуаций потока плазмы (верхний ряд) и модуля магнитного поля (нижний ряд) для прямой МУВ: левые панели — МГД-часть спектра, правые — переходная часть спектра; черным и зеленым цветами показаны данные для невозмущенной области СВ, красным и синим — для возмущенной

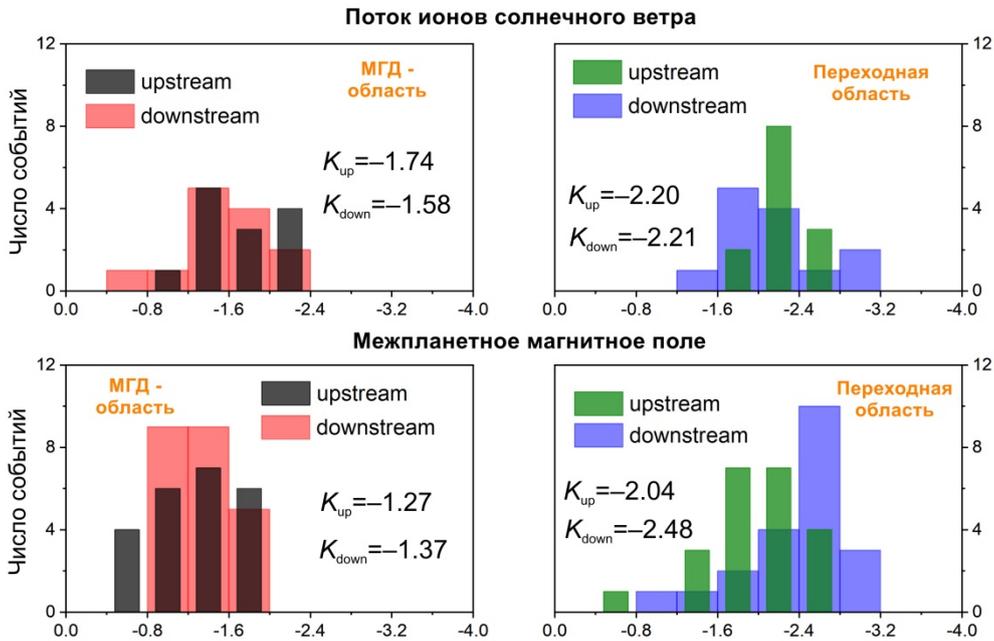


Рис. 8. Гистограммы распределения коэффициентов наклонов спектров флуктуаций потока плазмы (верхний ряд) и модуля магнитного поля (нижний ряд) для обратной МУВ: левые панели — МГД-часть спектра, правые — переходная часть спектра; черным и зеленым цветами показаны данные для невозмущенной области СВ, красным и синим — для возмущенной

и аппроксимацией наклона методом наименьших квадратов. Здесь мы используем первую методику.

Для магнитного поля можно заметить, что в МГД-части спектра наклон может быть больше в невозмущенной области. Данное наблюдение согласуется с результатами, полученными в работе [Rakhanova et al., 2017]. Этот же эффект мы наблюдаем и для наклона спектра мощности колебаний потока плазмы. В переходной области средний наклон спектра значительно меньше, чем

в МГД-области, что также согласуется с результатами предыдущих работ. Стоит отметить, что наклон спектра мощности флуктуаций ММП увеличивается сильнее, нежели для потока плазмы СВ.

На рис. 8 представлены гистограммы распределения коэффициентов наклона спектра мощности флуктуаций для потока плазмы и модуля ММП в случае обратной МУВ.

Как для потока плазмы, так и для модуля магнитного поля наклон спектра в переходной области

заметно больше, чем в МГД-области, — примерно на 0.5–0.7. Максимальная разница зафиксирована для спектра магнитного поля в возмущенной области — более 1.1.

При сравнении областей до и после фронта МУВ следует отметить относительно небольшое различие коэффициентов наклона в МГД-части спектра: разница для потока плазмы составила 0.16, а для модуля магнитного поля — 0.1. При этом распределения похожи, хотя для модуля магнитного поля в невозмущенной области характерны несколько меньшие абсолютные значения K для данной части спектра, а для потока — немного большие абсолютные значения K , чем в возмущенной области.

Несколько иначе ситуация выглядит в переходной области спектра. Среднее значение коэффициента наклона спектра флуктуаций потока почти одинаково для возмущенной и невозмущенной области. Однако распределения значительно различаются по форме — за фронтом обратной ударной волны диапазон значений шире (от -1.2 до -3.2), а максимум немного смещен. В невозмущенной области диапазон меньше (от -1.6 до -2.8). Гистограмма коэффициента наклона спектра магнитного поля показывает еще более серьезные различия. Помимо явного изменения среднего значения K (с -2.04 до -2.48) максимум распределения явно сдвинут в более крутую часть спектра. К такому различию между спектрами потока и магнитного поля, помимо физических причин, могли привести небольшая статистическая выборка и технические различия приборов (максимум измеряемой частоты магнитного поля по спутнику WIND — 5.5 Гц, а для потока плазмы по БМСВ — 16 Гц). Данный вопрос требует дальнейшего рассмотрения.

3. ОБСУЖДЕНИЯ И ВЫВОДЫ

По данным БМСВ на КА СПЕКТР-Р и магнитометра MFI спутника WIND были определены частоты излома спектров мощности флуктуаций полного потока плазмы СВ и магнитного поля до и после фронта обратной ударной волны. Вычислены коэффициенты наклона в МГД и в переходной частях спектра.

Для обратной ударной волны частота излома спектров составила от 0.53 до 1.31 Гц в возмущенной области и от 0.40 до 1.11 Гц в невозмущенной области. Средние значения этой частоты составили 0.94 и 0.75 Гц соответственно. Увеличение частоты в возмущенной области происходит за счет увеличения концентрации за фронтом обратной ударной волны.

Изучение изменений наклона разных частей спектра для обратной ударной волны дало несколько неоднозначный результат. Для модуля межпланетного магнитного поля была получена ожидаемая картина, хотя и с меньшим изменением коэффициента наклона при переходе в возмущенную область — спектр укрущается в переходной части, но сохраняет форму в МГД-части. Для потока плазмы за фронтом обратной ударной волны видно, что МГД-часть спектра становится чуть более пологой. Однако

эффект не настолько значителен, чтобы наверняка говорить о его физической причине. Не исключено также, что данный эффект возникает вследствие недостаточной статистики по быстрым обратным ударным волнам.

При этом переходная область спектра флуктуаций имеет сильно больший наклон, чем МГД-область, что было абсолютно ожидаемо. Величина же этого изменения при пересечении ударной волны может как увеличиваться, так и уменьшаться, в зависимости от события. Средние значения K показывают, что для магнитного поля укручение спектра значительнее, чем для потока плазмы. В отдельных случаях переходная часть спектра мощности в возмущенной области становилась более полой, что было показано и для прямых МУВ [Šafránková et al., 2015].

В дальнейшем предполагается подробное исследование отдельных событий, что поможет уточнить критерии, по которым стоило бы разбить статистику, начиная с классифицирующих параметров и частот перегиба спектра.

Работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-12-00227.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bruno R., Carbone V. The solar wind as a turbulence laboratory. *Living Rev. Solar Phys.* 2013. Vol. 10, no. 2. DOI: [10.12942/lrsp-2013-2](https://doi.org/10.12942/lrsp-2013-2).
- Howes G.G., Cowley S.C., Dorland W., et al. A model of turbulence in magnetized plasmas: Implications for the dissipation range in the solar wind. *Geophys. Res.* 2008. Vol. 113. DOI: [10.48550/arXiv.0707.3147](https://doi.org/10.48550/arXiv.0707.3147).
- Kolmogorov A.N. A refinement of previous hypotheses concerning the local structure of turbulence in a viscous incompressible fluid at high Reynolds number. *J. Fluid Mech.* 1962. Vol. 13. P. 82–85. DOI: [10.1017/S0022112062000518](https://doi.org/10.1017/S0022112062000518).
- Leamon R.J., Matthaeus W.H., Smith C.W., et al. MHD-driven kinetic dissipation in the solar wind and corona. *Astrophys. J.* 2000. Vol. 537, no. 2. P. 1054–1062. DOI: [10.1086/309059](https://doi.org/10.1086/309059).
- Matthaeus W.H., Weygand J.M., Dasso S. Ensemble space-time correlation of plasma turbulence in the solar wind. *Phys. Rev. Lett.* 2016. Vol. 116, 245101. DOI: [10.1103/PhysRevLett.116.245101](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.245101).
- Oliveira D.M. Magnetohydrodynamic shocks in the interplanetary space: A theoretical review. *Braz. J Phys.* 2017. Vol. 47. P. 81–95. DOI: [10.1007/s13538-016-0472-x](https://doi.org/10.1007/s13538-016-0472-x).
- Park B., Pitňa A., Šafránková J., et al. Change of spectral properties of magnetic field fluctuations across different types of interplanetary shocks. *Astrophys. J. Lett.* 2023. Vol. 954, no. 2. DOI: [10.3847/2041-8213/acf4ff](https://doi.org/10.3847/2041-8213/acf4ff).
- Pitňa A., Šafránková J., Němeček Z., et al. Turbulence upstream and downstream of interplanetary shocks. *Front. Phys.* 2021. Vol. 8, no. 626768. DOI: [10.3389/fphy.2020.626768](https://doi.org/10.3389/fphy.2020.626768).
- Rakhmanova L.S., Riazantseva M.O., Borodkova N.L., et al. Impact of interplanetary shock on parameters of plasma turbulence in the Earth's magnetosheath. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2017. Vol. 57, no. 6. P. 664–671. DOI: [10.1134/S0016793217060093](https://doi.org/10.1134/S0016793217060093).
- Šafránková J., Němeček Z., Přeč L., et al. Fast solar wind monitor (BMSW): Description and first results. *Space Sci. Rev.* 2013. Vol. 175 (1-4). P. 165–182. DOI: [10.1007/s11214-013-9979-4](https://doi.org/10.1007/s11214-013-9979-4).
- Šafránková J., Němeček Z., Němec F., et al. Solar wind density spectra around the ion spectral break. *Astrophys. J.* 2015. Vol. 803. P. 107. DOI: [10.1088/0004-637X/803/2/107](https://doi.org/10.1088/0004-637X/803/2/107).

Šafránková J., Němeček Z., Němec F., et al. Power spectral density of fluctuations of bulk and thermal speeds in the solar wind. *Astrophys. J.* 2016. Vol. 825. P. 121. DOI: [10.3847/0004-637X/825/2/121](https://doi.org/10.3847/0004-637X/825/2/121).

Sapunova O.V., Borodkova N.L., Yermolaev Yu.I., Zastenker G.N. Spectra of fluctuations of solar wind plasma parameters near a shock wave. *Cosmic Res.* 2024. Vol. 62, no.1. P. 1–9. DOI: [10.1134/S0010952523700843](https://doi.org/10.1134/S0010952523700843).

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. Ser.* 2009. Vol. 182, no. 1. P. 310–377. DOI: [10.1088/0067-0049/182/1/310](https://doi.org/10.1088/0067-0049/182/1/310).

Smith C.W., Mullan D.J., Ness N.F., et al. Day the solar wind almost disappeared: Magnetic field fluctuations, wave refraction and dissipation. *Geophys. Res.* 2001. Vol. 106. P. 18625–18634. DOI: [10.1029/2001JA000022](https://doi.org/10.1029/2001JA000022).

Zastenker G.N., Safrankova J., Nemecek Z., et al. Fast measurements of parameters of the solar wind using the BMSW instrument. *Cosmic Res.* 2013. Vol. 51. P. 78. DOI: [10.1134/S0010952513020081](https://doi.org/10.1134/S0010952513020081).

Zhao L.-L., Zank G.P., He J.S., et al. Turbulence and wave transmission at an ICME-driven shock observed by the Solar Orbiter and Wind. *Astron. and Astrophys.* 2021. Vol. 656, no. A3. DOI: [10.1051/0004-6361/202140450](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140450).

Статья подготовлена по материалам Девятнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 5–9 февраля 2024 г., ИКИ РАН, Москва.

Как цитировать эту статью:

Сапунова О.В., Бородкова Н.Л., Застенкер Г.Н. Анализ спектров флуктуаций величины потока плазмы и модуля магнитного поля на обратных ударных волнах. *Солнечно-земная физика.* 2024. Т. 10, № 3. С. 62–69. DOI: [10.12737/szf-103202407](https://doi.org/10.12737/szf-103202407).