

УДК 523.62-726

ЗАВИСИМОСТЬ СВОЙСТВ ТУРБУЛЕНТНОГО КАСКАДА ЗА ОКОЛОЗЕМНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ ОТ ДИНАМИКИ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

© 2020 г. Л. С. Рахманова¹*, М. О. Рязанцева¹, Г. Н. Застенкер¹,
Ю. И. Ермолаев¹, И. Г. Лодкина¹

¹Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

*rakhlud@gmail.com

Поступила в редакцию 24.03.2020 г.

После доработки 24.03.2020 г.

Принята к публикации 29.05.2020 г.

Магнитослой является неотъемлемым элементом солнечно-земных связей. В работе анализируется влияние параметров солнечного ветра и их вариабельности, а также топологии околоземной ударной волны, на характеристики турбулентности плазмы в магнитослое на масштабах, соответствующих переходу от инерционной области турбулентного каскада к диссипативной. Анализ основан на обширной статистике измерений прибора БМСВ на спутнике *Спектр-Р* в магнитослое в 2011–2018 гг. с высоким временным разрешением. Показано, что наибольшее влияние на вид турбулентного каскада непосредственно за околоземной ударной волной оказывает вариабельность плотности плазмы солнечного ветра и модуля межпланетного магнитного поля, а также угол между нормалью к околоземной ударной волне и межпланетным магнитным полем.

DOI: 10.31857/S0023420620060084

ВВЕДЕНИЕ

Спутниковые измерения, проводимые в последние десятилетия, показывают, что турбулентность является характерной чертой плазмы солнечного ветра и магнитослоя (см. обзоры [1, 2]). Как правило, в случае свободно развивающейся турбулентности, можно выделить несколько диапазонов масштабов в турбулентном каскаде. Считается, что в солнечном ветре (СВ) энергия системы содержится в структурах с масштабами более 10^6 км и передается на меньшие масштабы через каскад турбулентных флуктуаций. При этом образуется инерционная область каскада, характеризующаяся степенной функцией с показателем $-5/3$ (так называемый колмогоровский спектр, [3–5]). На масштабах порядка гирорадиуса протона ($\sim 10^3$ км) важную роль начинают играть кинетические процессы, и происходит диссипация энергии и, как следствие, нагрев плазмы. Таким образом, исследование турбулентного каскада на масштабах порядка и менее гирорадиуса протона (так называемая диссипативная область каскада) с помощью непосредственных измерений на космических аппаратах представляет интерес для понимания процессов нагрева в бесстолкновительной плазме.

Околоземная ударная волна (ОЗУВ), образующаяся при обтекании СВ магнитосферы Земли,

может существенным образом видоизменять характеристики турбулентности при движении потока плазмы к Земле и, таким образом, влиять на передачу энергии СВ в магнитосферу. Отличие формы турбулентного каскада, наблюдаемого в магнитослое (МСЛ) за ОЗУВ, от типичной формы, наблюдаемой в невозмущенном СВ, было продемонстрировано неоднократно с помощью измерений магнитного поля [6–8]. Аналогичные исследования для характеристик параметров плазмы были представлены только в последние годы, как статистически, на основе измерений спутника *Спектр-Р* [9–11], так и для отдельных пересечений МСЛ по данным миссии MMS (напр., [12]). В частности, было показано, что ОЗУВ по-разному влияет на характеристики турбулентности СВ, относящегося к различным крупномасштабным типам [11]. Поэтому представляется важным рассмотреть, какие непосредственные параметры СВ оказывают наибольшее влияние на модификацию турбулентного каскада за ОЗУВ.

В настоящей работе проводится статистический анализ влияния характеристик СВ и межпланетного магнитного поля (ММП) и их динамики на форму и мощность турбулентного каскада в МСЛ. Анализ проводится на основе быстрых измерений параметров плазмы прибором БМСВ

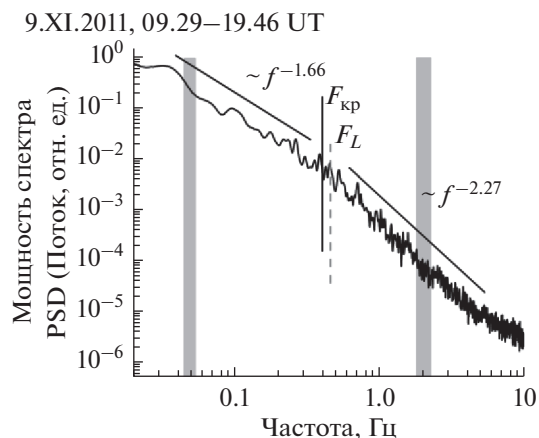


Рис. 1. Пример спектра флуктуаций потока ионов, измеренного в МСЛ вблизи ОЗУВ. Характеристики спектра указаны на рисунке. Сплошная вертикальная линия обозначает частоту излома спектра $F_{кр}$, штриховая вертикальная линия обозначает характерную частоту F_L .

на космическом аппарате *Спектр-Р*, которые позволяют рассматривать спектр флуктуаций потока ионов в широком диапазоне частот, охватывающих магнитогидродинамические (МГД) и кинетические масштабы (т.е. масштабы, соответствующие переходу от инерционной области каскада к диссипативной). Анализируется несколько сотен спектров флуктуаций потока ионов, полученных в области непосредственно за ОЗУВ. Для каждого события определяются параметры набегающего потока солнечного ветра на основе данных спутника *WIND*, а также топология ОЗУВ в точке входа плазмы в МСЛ. Проведенное исследование позволяет оценить зависимость свойств турбулентного каскада за ОЗУВ от параметров плазмы СВ и ММП, а также их динамики.

ДАННЫЕ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА

В работе использовались данные прибора БМСВ на спутнике *Спектр-Р* [13, 14]. Прибор измерял величину и направление прихода потока ионов с временным разрешением 0.031 с, а также полную функцию распределения ионов по энергиям, используемую для вычисления плотности, скорости и температуры протонов, каждые 3 с. В общей сложности, за период работы прибора – с 2011 по 2019 гг. – было отобрано и проанализировано 46 непрерывных пересечений МСЛ длительностью не менее 2 ч, что соответствует 250 ч измерений.

Для определения характеристик турбулентности плазмы в магнитослое рассматривались Фурье-спектры флуктуаций величины потока ионов. Спектры вычислялись на интервалах длительностью около 17 мин, что соответствует более чем

$3 \cdot 10^4$ точек. Длительность интервалов обеспечивает стационарность условий в потоке плазмы одновременно с достаточным количеством точек для достоверного определения характеристик спектров как на МГД, так и на кинетических масштабах. Перед вычислением Фурье-спектра для каждого рассматриваемого интервала проводилась нормировка на среднее значение потока ионов на интервале. В общей сложности было получено 1450 спектров в МСЛ. Пример рассматриваемого спектра приведен на рис. 1. Спектр может быть аппроксимирован двумя степенными функциями с показателями степени (наклонами) $S_1 = -1.66 \pm 0.15$ на МГД и $S_2 = -2.71 \pm 0.08$ на кинетических масштабах. Излом спектра – изменение показателя степени – происходит на частоте $F_{кр} = 0.39 \pm 0.06$ Гц.

Как правило, положение излома спектра при переходе от МГД масштабов к кинетическим связывается с процессами, ответственными за диссипацию энергии в плазме. Например, если турбулентный каскад рассматривается как передача энергии между тонкими токовыми слоями, то излом должен наблюдаться на масштабе инерционной длины протона L (напр., [15, 16]). С другой стороны, если рассматривать турбулентность как каскад альфвеновских флуктуаций, переходящих на субионных масштабах в кинетические альфвеновские волны, то излом спектра ожидается на масштабе гирорадиуса протона R (напр., [17, 18]). На рисунке 1 показана частота, определяемая инерционной длиной протона – $F_L = V/2\pi L$, где V – потоковая скорость плазмы, $L = c/\omega_i$ – инерционная длина протона, $\omega_i = (4\pi n_i/m_i)^{1/2}$ – плазменная частота протона. Вычисление прочих характерных частот требует информации о магнитном поле, которое не измерялось на спутнике *Спектр-Р*. В отличие от СВ, где с хорошей степенью точности можно трассировать магнитное поле со спутника *WIND* к спутнику *Спектр-Р*, в МСЛ такое трассирование возможно только при очень редких условиях (напр., [19]). Для примера, представленного на рис. 1, частота излома близка к частоте F_L . Следует отметить, что, согласно статистическим исследованиям реально измеренных спектров, излом не всегда возможно связать с какой-либо одной характерной частотой, поскольку частоты F_L и F_R , как правило, имеют близкие значения [20, 21].

В дальнейшем в работе будут проанализированы зависимости наклонов спектров S_1 и S_2 за ОЗУВ от ряда параметров СВ. Также рассматривалась зависимость интенсивности флуктуаций на МГД и кинетических масштабах от параметров СВ, для чего для каждого из спектров вычислялась мощность в диапазонах частот 0.05 ± 0.005 и 2 ± 0.2 Гц (отмечены вертикальными серыми полосами на рис. 1). Диапазоны выбраны в соответствии с проведенным ранее статистическим ана-

лизом [19], показавшим, что излом спектра в подавляющем большинстве случаев наблюдается между указанными частотами. Как было показано в предыдущих статистических исследованиях [9, 10], частотные спектры флуктуаций потока ионов в МСЛ могут иметь особенности на рассматриваемых масштабах, такие как пик или плато в окрестности излома, а также нелинейный спад спектра при увеличении частоты. В данной работе при определении параметра S_1 не рассматривались спектры с пиком, тогда как при определении S_2 не рассматривались спектры с нелинейным спадом в связи с невозможностью аппроксимации данных спектров степенной функцией на МГД и кинетических масштабах, соответственно.

Из доступной статистики были выбраны периоды времени, когда *Спектр-Р* находился в непосредственной близости к ОЗУВ. Для этого по методике, предложенной в работе [22], было определено относительное расстояние от точки измерения в магнитослое до его границ — ОЗУВ и магнитопаузы, — положение которых вычислялось согласно существующим моделям [23, 24]. Полученное расстояние D может иметь значения в диапазоне $[0, 1]$, где 0 соответствует пересечению магнитопаузы, а 1 — пересечению ОЗУВ. Для рассмотрения интервалов вблизи ОЗУВ были выбраны только интервалы с $D > 0.75$. В общей сложности статистика включает 416 таких интервалов. Для примера, представленного на рис. 1, значение $D = 0.86$.

Для каждого из рассмотренных интервалов были определены параметры СВ и ММП по данным спутника *WIND* в точке либрации L_1 . При этом учитывалось время распространения плазмы между двумя космическими аппаратами. В первом приближении указанное время распространения определялось исходя из расстояния между космическими аппаратами и скорости плазмы в СВ. На втором этапе время распространения корректировалось на основе кросскорреляционного анализа временных профилей потока ионов, измеренных на обоих космических аппаратах, что позволило с высокой степенью достоверности рассматривать один и тот же объем плазмы на разных спутниках для каждого из интервалов, несмотря на расположение космических аппаратов по разную сторону от ОЗУВ. Использовались данные по параметрам плазмы с прибора *SWE* [25] с временным разрешением 92 с и измерения магнитного поля с прибора *MFI* [26] с разрешением 1 мин. Анализировались такие параметры солнечного ветра, как плотность протонов N , относительное стандартное отклонение плотности RSD_N на рассматриваемом 17-ти минутном интервале, позволяющее оценить вариабельность плотности, потоковая скорость протонов V , модуль магнитного поля B , относительное стандарт-

ное отклонение модуля магнитного поля RSD_B , значение B_z компоненты ММП, отношение теплового давления протонов к магнитному β , а также значение угла θ_{BN} между нормалью к ОЗУВ и направлением ММП, вычисленное в точке входа плазмы в МСЛ (вычислялось по методике, описанной в работе [27]). Для спектра, представленного в качестве примера на рис. 1, значения всех рассматриваемых параметров составляли: $N = 3 \text{ см}^{-3}$, $RSD_N = 0.08$, $B = 4 \text{ нТл}$, $RSD_B = 0.02$, $B_z = 3 \text{ нТл}$, $V = 400 \text{ км/с}$, $\beta = 0.2$, $\theta_{BN} = 72^\circ$.

РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

На рис. 2 приведены зависимости наклона спектра флуктуаций потока ионов на МГД масштабах от ряда параметров СВ. Для наглядности серыми линиями показаны средние значения S_1 для выделенных диапазонов значений соответствующих параметров. Вертикальными линиями обозначены стандартные отклонения значений от среднего. Штриховыми горизонтальными линиями показано значение $S_1 = -5/3$, предсказываемое большинством теорий развитой турбулентности на МГД масштабах и наблюдающееся в невозмущенном СВ [2, 28]. Как видно из рис. 2а, 2в наклон спектра флуктуаций потока ионов на МГД масштабах за ОЗУВ не зависит явно от значений плотности СВ и модуля ММП. Однако, наблюдается зависимость от вариабельности этих параметров: несмотря на широкое распределение значений S_1 видно, что в то время как при отклонениях плотности СВ от среднего значения в пределах 10% ($RSD_N < 0.1$) за ОЗУВ значительная часть спектров имеет наклон $S_1 > -5/3$, то есть сильно отличающиеся от колмогоровских спектров, при больших вариациях плотности (более 20%) спектры имеют наклоны, как правило, близкие к $-5/3$ (см. панель б). Аналогичный результат можно получить и для зависимости от вариаций модуля ММП (см. панель г).

Несмотря на то, что статистика интервалов с большими значениями RSD ограничена, эти интервалы наблюдались в различные дни и при различных прочих условиях в СВ. Можно сделать вывод, что в периоды слабо возмущенного течения набегающего СВ за ОЗУВ могут наблюдаться существенные отклонения спектров от колмогоровского вида, тогда как при больших вариациях плотности плазмы и модуля ММП спектры, как правило, на МГД масштабах имеют форму, близкую к теоретическим предсказаниям.

На рис. 2д приведена зависимость наклона S_1 от угла θ_{BN} между нормалью к ОЗУВ и направлением ММП. Известно, что значение данного угла во многом определяет динамику плазмы за ОЗУВ

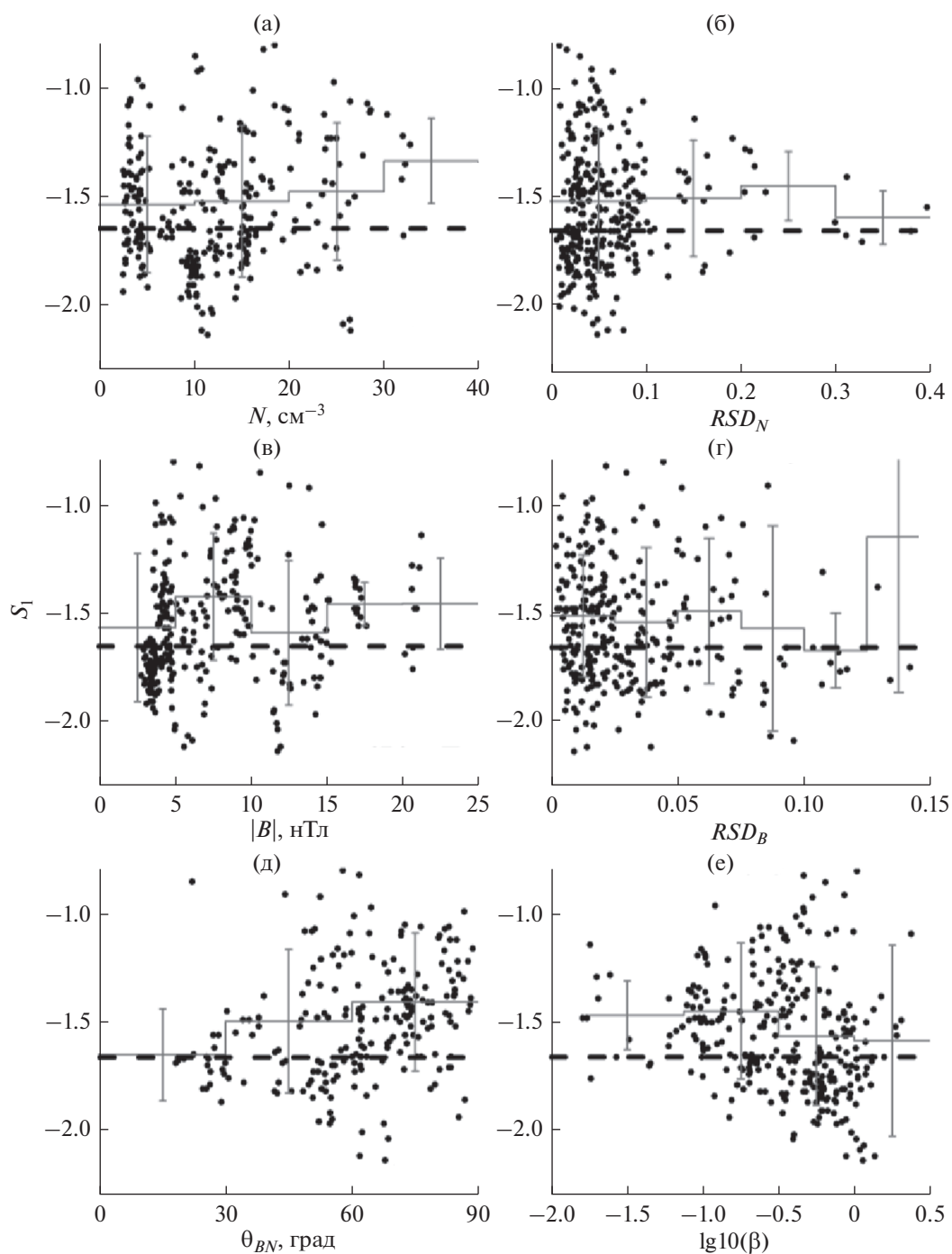


Рис. 2. Зависимость наклона спектра флуктуаций потока ионов на МГД масштабах в МСЛ S_1 от: (а) N ; (б) RSD_N ; (в) B ; (г) RSD_B ; (д) θ_{BN} ; (е) β .

[27, 29]: за квазиперпендикулярной ОЗУВ ($\theta_{BN} > 45^\circ$) флуктуации параметров плазмы и магнитного поля составляют в среднем 10% величины, тогда как за квазипараллельной ОЗУВ ($\theta_{BN} < 45^\circ$) флуктуации параметров могут достигать 100% величины параметра. Согласно результатам, приведенным на рис. 2д, при значениях $\theta_{BN} < 30^\circ$ большинство

спектров близки к колмогоровским, тогда как при $\theta_{BN} > 60^\circ$ большая часть спектров является более пологой на МГД масштабах. Таким образом, за квазиперпендикулярной ОЗУВ чаще наблюдается отклонение спектра от колмогоровского вида, тогда как за квазипараллельной ОЗУВ спектры, как правило, соответствуют теоретическим предсказаниям.

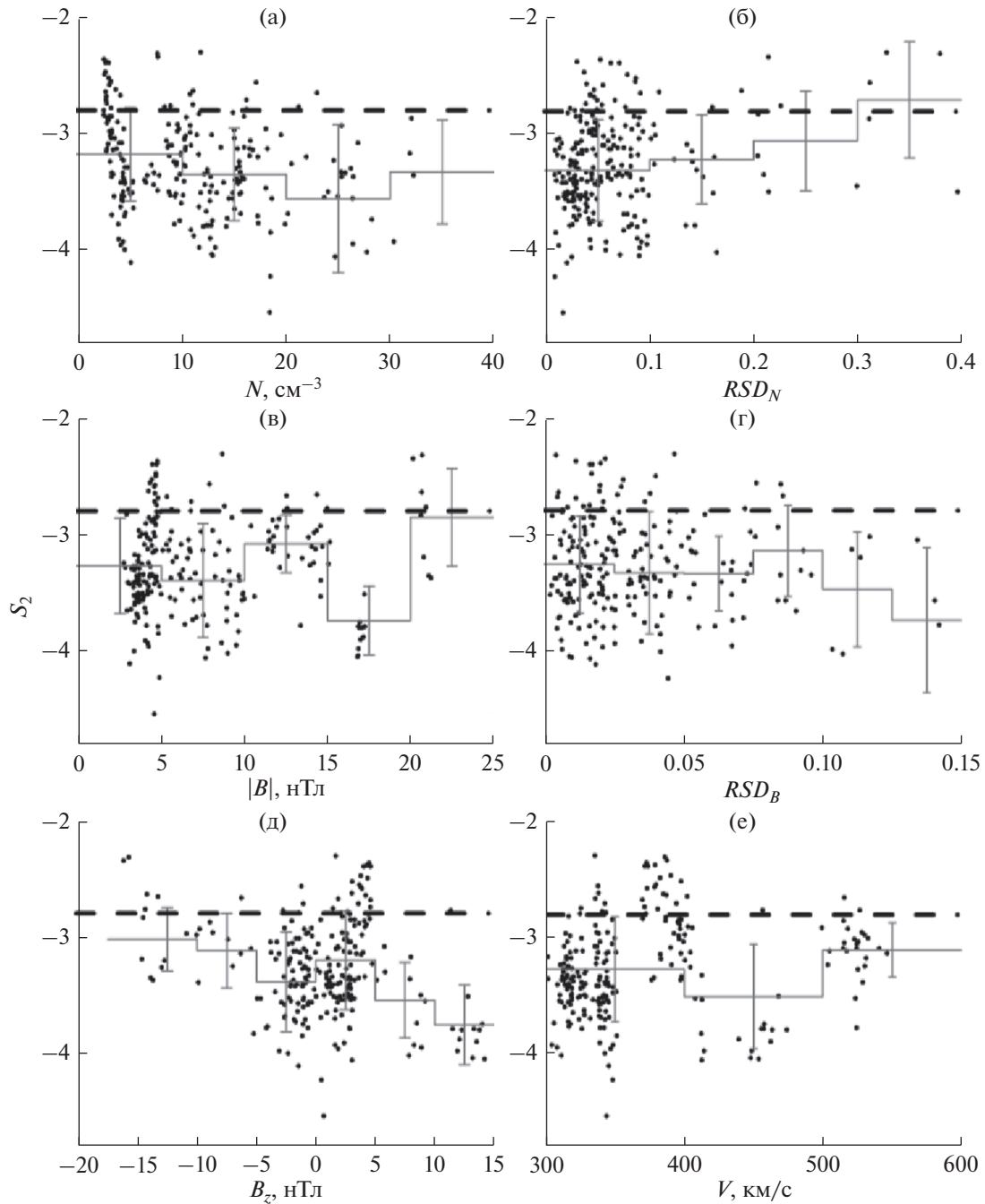


Рис. 3. Зависимость наклона спектра флуктуаций потока ионов на кинетическом масштабе в МСЛ S_2 от: (а) N ; (б) RSD_N ; (в) B ; (г) RSD_B ; (д) B_z ; (е) V .

Одним из важных параметров, определяющих характеристики плазмы СВ и топологию ОЗУВ [30], является плазменный параметр β – отношение теплового давления протонов к магнитному. На рис. 2е представлена зависимость наклона S_1 от этого параметра. Как можно видеть, есть тенденция к уменьшению разброса значений параметра S_1 при $\beta \ll 1$, тогда как при значениях $\beta \sim 1$ наблюдается широкое распределение по S_1 . Одна-

ко, эта тенденция отображает, скорее всего, слабую зависимость S_1 от B , приведенную на рис. 2в. От прочих параметров СВ и ММП (включая скорость плазмы и значение B_z компоненты ММП, не представленные на рис. 2) не удалось выделить зависимостей для наклонов спектров на МГД масштабах.

На рис. 3 по аналогии с рис. 2 приведены зависимости наклона на кинетической части спектра

флуктуаций потока ионов за ОЗУВ — S_2 — от параметров плазмы СВ и ММП. Штриховыми линиями показано значение $S_2 = -2.8$, характерное в среднем для флуктуаций потока ионов в невозмущенном СВ [31] и близкое к $-8/3$, предсказанному в теории [32]. Из всех панелей рисунка видно, что в среднем за ОЗУВ наблюдаются более крутые спектры, чем в среднем в медленном невозмущенном СВ и чем предсказывается в теории. Из панелей а, в видно, что значение наклона спектра на кинетических масштабах S_2 в среднем не изменяется при увеличении плотности плазмы СВ и модуля ММП, аналогично с тем, что наблюдалось на МГД масштабах. При этом, согласно рис. 3б, при увеличении амплитуды флуктуаций плотности плазмы в СВ, спектры за ОЗУВ имеют наклоны, близкие к теоретическим предсказаниям и к наблюдениям в невозмущенном СВ. Однако, при увеличении флуктуаций модуля ММП, напротив, наблюдается тенденция к еще большему укрупнению спектров на кинетических масштабах за ОЗУВ. Не было выявлено зависимости S_2 от значений угла θ_{BN} и параметра β , поэтому зависимости от этих факторов на рис. 3 не приводятся. Однако, на рис. 3д приведена зависимость наклона S_2 от значения B_z компоненты ММП. Хорошо видно, что существует асимметрия в значениях наклона спектров при южном и северном направлении ММП: при большом по модулю и ориентированном на север векторе ММП наблюдаются более крутые спектры флуктуаций потока ионов за ОЗУВ, что может свидетельствовать о более высоких темпах диссипации. При этом, при южной ориентации ММП спектры за ОЗУВ на кинетических масштабах имеют наклон, близкий к предсказываемому в теориях и наблюдающемуся в СВ. Помимо этого, удалось выделить зависимость наклона спектра на кинетических масштабах от скорости плазмы, чего не наблюдалось для МГД масштабов: как видно из рис. 3е, при медленном СВ ($V < 450$ км/с) за ОЗУВ наблюдается широкий разброс значений наклона спектра, тогда как при быстром течении СВ ($V > 450$ км/с) наклоны спектров преимущественно имеют значения близкие к -3 , т.е. близкие к тому, что наблюдается в среднем в СВ. Обсуждение причин таких зависимостей представлено в следующем разделе.

Также было проанализировано, как мощность спектра флуктуаций потока ионов за ОЗУВ зависит от параметров СВ и их варибельности. Для всех 416 спектров, полученных в МСЛ в непосредственной близости от ОЗУВ, были определены значения мощности спектра PSD в двух диапазонах частот — 0.05 ± 0.005 и 2 ± 0.2 Гц. Как было указано выше, данные диапазоны частот лежат внутри МГД и кинетических масштабов, соответственно. Были рассмотрены зависимости от всех

указанных выше параметров СВ и от угла θ_{BN} . На рис. 4 показаны только те из них, для которых удалось выделить связь мощности флуктуаций потока ионов в МСЛ с параметрами СВ. Черным цветом показаны зависимости для мощности спектров на МГД масштабах, серым — на кинетических. Ступенчатой диаграммой показаны средние значения в определенных диапазонах значений рассматриваемого параметра, и приведены стандартные отклонения этих значений.

Из рис. 4а видно, что в среднем мощность флуктуаций потока ионов в МСЛ как на МГД, так и на кинетических масштабах не зависит от плотности плазмы СВ. Слабая зависимость наблюдается от вариаций плотности СВ (рис. 4б): при увеличении RSD_N в СВ, в МСЛ наблюдается увеличение мощности флуктуаций на обоих масштабах.

Согласно панели в рис. 4, при увеличении модуля ММП за ОЗУВ наблюдается небольшое уменьшение мощности флуктуаций с масштабами более гирорадиуса протона. При этом мощность более мелкомасштабных флуктуаций в среднем монотонно увеличивается. Существует также однозначная зависимость мощности турбулентных спектров в МСЛ от топологии ОЗУВ: за квазипараллельной ОЗУВ мощность спектров в среднем выше, чем за квазиперпендикулярной, причем как для МГД, так и для кинетических масштабов (рис. 4г). Не удалось выявить зависимости мощности спектра флуктуаций потока ионов от плазменного параметра β , от скорости СВ и B_z компоненты ММП, а также от амплитуды вариаций модуля ММП.

Следует отметить, что мощность флуктуаций и наклон спектра могут не являться независимыми величинами: как на МГД, так и на кинетических масштабах большая мощность спектра, как правило, соответствует большим по модулю наклонам, т.е. более крутым спектрам [33]. Таким образом, полученные на рис. 2 и 3 зависимости наклона спектра от варибельности плотности и от угла θ_{BN} хорошо соответствуют зависимостям, полученной на рис. 4.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В работе на основе статистического анализа было рассмотрено влияние параметров СВ и их динамики на характеристики турбулентности плазмы в МСЛ за ОЗУВ на масштабах, соответствующих переходу от инерционной к диссипативной области турбулентного каскада.

Полученные зависимости свидетельствуют о том, что на МГД масштабах за квазипараллельной ОЗУВ турбулентный каскад, как правило, соответствует теоретическим предсказаниям, т.е. спектр может быть аппроксимирован степенной функцией с показателем $-5/3$. За квазиперпенди-

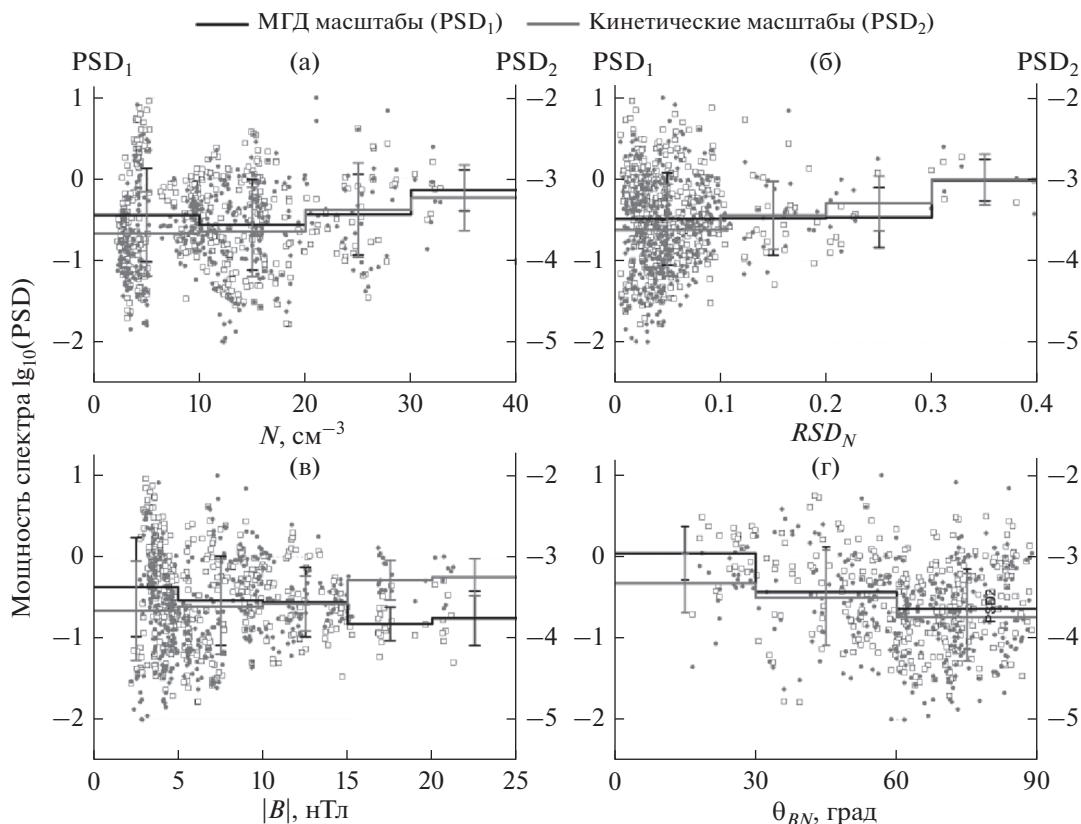


Рис. 4. Зависимость мощности спектра флуктуаций потока ионов в МСЛ на МГД (черные линии, квадратные символы) и кинетических масштабах (серые линии, круглые символы) от: (а) N ; (б) RSD_N ; (в) B ; (г) угла θ_{BN} .

кулярной ОЗУВ, в среднем, наклоны спектров меньше по модулю, чем за квазипараллельной и чем наблюдается, как правило, в СВ. При этом зависимость наклона на кинетических масштабах от угла θ_{BN} отсутствует. Аналогичные выводы следуют и из рисунков, представленных в работе [6], однако провести сравнение напрямую представляется затруднительным, поскольку авторы проводили анализ методом наложения эпох. Таким образом, можно предположить, при пересечении квазипараллельной ОЗУВ общий более высокий уровень флуктуаций перед ней (в форшоке) может обеспечивать баланс энергии в каскаде, приводящий к наблюдению за квазипараллельной ОЗУВ спектров, близких по виду к теоретическим предсказаниям, т.е. вид турбулентного каскада в меньшей мере определяется влиянием ОЗУВ. Напротив, пересечение квазиперпендикулярной ОЗУВ приводит к поступлению к турбулентный каскад дополнительной энергии на фоне спокойных внешних условий (в частности, отсутствия отраженных от ОЗУВ частиц), что приводит к более значимому отклонению формы спектра от теоретических предсказаний вследствие того, что баланс между различными областями турбулентного каскада, обеспечиваемый процессами дис-

сипации, не успевает сформироваться. Кроме того, показано, что мощность спектров как на кинетических, так и на МГД масштабах увеличивается при уменьшении угла θ_{BN} , что соответствует представленным ранее результатам [27].

Важным результатом является наблюдение за ОЗУВ спектров, близких к наблюдающимся в СВ, в условиях сильных вариаций плотности плазмы СВ и модуля ММП. То есть ОЗУВ может вносить существенный вклад в формирование турбулентного каскада в МСЛ только при взаимодействии с ней стационарного потока СВ. При этом дополнительно проведенный анализ выявил, что такое изменение формы спектров наблюдается как за квазипараллельной, так и за квазиперпендикулярной ОЗУВ. В условиях сильных вариаций параметров в СВ турбулентный каскад формируется в набегающем потоке, и пересечение ОЗУВ оказывает на турбулентность существенно меньшее влияние, чем в случае квазистационарного медленного потока СВ. При этом сами значения плотности и модуля ММП не оказывают существенного влияния на турбулентный каскад за ОЗУВ.

В работе [11] было показано, что для течения СВ типа Sheath (по каталогу Ермолаев и др. [34]) наклон спектров флуктуаций потока ионов за

ОЗУВ, в среднем, меньше по модулю, т. е. спектры более плоские, чем для остальных типов СВ. Данный тип СВ является областью сжатия, формирующейся при распространении в медленном СВ таких плазменных образований, как магнитные облака или корональные выбросы массы, и характеризуется повышенными значениями плотности. Однако, в указанной работе не проводилось селекции по вариабельности плотности внутри области сжатия. В настоящей работе практически все случаи наблюдения больших вариаций плотности плазмы СВ наблюдались в периоды СВ типа Sheath, при этом наибольшим вариациям плотности соответствуют умеренные значения самого параметра. Такое поведение также свидетельствует о доминирующем влиянии на формирование турбулентного каскада за ОЗУВ вариабельности плотности, а не ее величины.

Существует также связь между вариациями плотности СВ и мощностью флуктуаций потока ионов за ОЗУВ: при увеличении амплитуды вариаций плотности мощность спектров в МСЛ как на МГД, так и на кинетических масштабах увеличивается. При этом значения модуля ММП и плотности оказывают слабое влияние на мощность спектров на кинетических масштабах.

Следует отметить, что большое по модулю ММП с преимущественно северной ориентацией ($B_z > 0$) приводит к формированию более крутых спектров на кинетических масштабах за ОЗУВ, что может свидетельствовать об увеличении темпов диссипации энергии и/или о влиянии волновых явлений. При преимущественно южной ориентации ММП спектры за ОЗУВ, напротив, близки к наблюдающимся в СВ и предсказываемым теориями, т. е. ОЗУВ оказывает меньшее влияние на формирование турбулентности при таких условиях. Уменьшение скорости СВ может также приводить к ускорению процессов диссипации за ОЗУВ, сопровождающемуся наблюдением более крутых спектров, чем характерно для плазмы СВ, на кинетических масштабах, однако не оказывает влияния на спектры на МГД масштабах.

Таким образом, в данной работе показано, что:

1) ОЗУВ оказывает наименьшее влияние на изменение турбулентного каскада в МСЛ при высоком уровне вариабельности параметров в СВ (таких как плотности плазмы и модуля ММП), а также при высоких скоростях плазмы СВ и южной ориентации ММП; таким образом, сильные вариации параметров СВ обеспечивают прямую передачу энергии флуктуаций СВ в МСЛ, однако, такие случаи наблюдаются сравнительно редко.

2) При стационарном течении плазмы СВ на характеристики турбулентности в МСЛ доминирующее влияние оказывает ОЗУВ, пересечение которой приводит к несбалансированности энер-

гии в каскаде; такие условия в СВ наблюдаются большую часть времени;

3) Более заметный вклад в изменение турбулентного каскада при входе плазмы в МСЛ оказывает квазиперпендикулярная ОЗУВ, тогда как за квазипараллельной ОЗУВ спектры имеют наклоны, аналогичные наблюдаемым в невозмущенном СВ.

Впервые выявлено, что на изменение характеристик турбулентного каскада на ОЗУВ большое влияние оказывает динамика значений параметров СВ, а также геометрия ОЗУВ. Указанные зависимости характеристик турбулентности от параметров набегающего потока СВ и их динамики необходимо учитывать при рассмотрении взаимодействия плазмы солнечного ветра с магнитосферой.

Авторы выражают благодарность своим коллегам в ИКИ РАН, в НПО им. С.А. Лавочкина и в Карловом Университете (Прага, Чехия) за помощь в разработке, отладке, калибровке, полетном контроле, а также за сбор, передачу и первичную обработку научной информации с прибора БМСВ. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-02-00177.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bruno R., Carbone V. The solar wind as a turbulence laboratory // *Living Reviews in Solar Physics*. 2003. V. 10. P. 2.
2. Alexandrova O., Chen C.H.K., Sorriso-Valvo L. et al. Solar Wind Turbulence and the Role of Ion Instabilities // *Space Science Reviews*. 2013. V. 178. P. 101–139.
3. Колмогоров А.Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // *Доклады Академии наук СССР*. 1941. Т. 30. № 4. С. 299.
4. Goldreich P., Sridhar S. Toward a theory of interstellar turbulence. 2: Strong alfvénic turbulence // *Astrophysical Journal*. 1995. V. 438. P. 763. <https://doi.org/10.1086/175121>
5. Goldreich P., Sridhar S. MHD Turbulence Revisited // *Astrophysical Journal*. 1997. V. 485. № 2. P. 680–688. <https://doi.org/10.1086/304442>
6. Czakowska A., Bauer T.M., Treumann R.A., Baumjohann W. Magnetic field fluctuations across the Earth's bow shock // *Annales Geophysicae*. 2001. V. 19. № 3. P. 275–287. <https://doi.org/10.5194/angeo-19-275-2001>
7. Huang S.Y., Hadid L.Z., Sahraoui F. et al. On the Existence of the Kolmogorov Inertial Range in the Terrestrial Magnetosheath Turbulence // *Astrophysical Journal Letters*. 2017. V. 836. № 1. L10.
8. Козак Л.В., Пилипенко В.А., Чугунова О.М., Козак П.Н. Статистический анализ турбулентности форшоковой области и магнитослоя земли // *Космич. исслед.* 2011. Т. 49. № 3. С. 202–212. (*Cosmic Research*. P. 194.)

9. *Rakhmanova L., Riazantseva M., Zastenker G., Verigin M.* Kinetic-scale ion flux fluctuations behind the quasi-parallel and quasi-perpendicular bow shock // *Geophysical Research: Space Physics*. 2018. V. 123. P. 5300–5314. <https://doi.org/10.1029/2018JA025179>
10. *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.
11. *Рахманова Л.С., Рязанцева М.О., Застенкер Г.Н. и др.* Влияние характеристик турбулентности плазмы солнечного ветра на свойства турбулентного каскада в магнитослое // *Космич. исслед.* 2019. Т. 57. № 6. С. 461–468. (*Cosmic Research*. P. 443–450)
12. *Macek W.M., Krasnińska A., Silveira M.V.D. et al.* Magnetospheric Multiscale Observations of Turbulence in the Magnetosheath on Kinetic Scales // *Astrophysical Journal*. 2018. V. 864. L27.
13. *Застенкер Г.Н., Шафранкова Я., Немецек З. и др.* Быстрые измерения параметров солнечного ветра с помощью прибора БМСВ // *Космич. исслед.* 2013. Т. 51. № 2. С. 88–99. (*Cosmic Research*. P. 78.)
14. *Šafránková J., Němeček Z., Přeč L. et al.* Fast Solar Wind Monitor (BSMW): Description and First Results // *Space Science Reviews*. 2013. V. 175. P. 165–182.
15. *Leamon R.J., Matthaeus W.H., Smith C.W. et al.* MHD-driven Kinetic dissipation in the solar wind and corona // *Astrophysical Journal*. 2000. V. 537. P. 1054–1062. <https://doi.org/10.1086/309059>
16. *Smith C.W., Mullan D.J., Ness N.F. et al.* Day the solar wind almost disappeared: Magnetic field fluctuations, wave refraction and dissipation // *Geophysical Research*. 2001. V. 106. P. 18625–18634. <https://doi.org/10.1029/2001JA000022>
17. *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 // *Geophysical Research*. 2008. V. 113. A05103.
18. *Schekochihin A.A., Cowley S.C., Dorland W. et al.* Astrophysical gyrokinetics: kinetic and fluid turbulent cascades in magnetized weakly collisional plasmas // *Astrophysical Journal Supplement Series*. 2009. V. 182. № 1. P. 310–377. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/182/1/310>
19. *Rakhmanova L., Riazantseva M., Zastenker G.* Plasma fluctuations at the flanks of the Earth's magnetosheath at ion kinetic scales // *Annales Geophysicae*. 2016. V. 34. P. 1011–1018.
20. *Markovskii S.A., Vasquez B.J., Smith C.W.* Statistical Analysis of the High-Frequency Spectral Break of the Solar Wind Turbulence at 1 AU // *Astrophysical Journal*. 2008. V. 675. № 2. P. 1576–1583. <https://doi.org/10.1086/527431>
21. *Šafránková J., Němeček Z., Němec F. et al.* Power spectral density of fluctuations of bulk and thermal speeds in the solar wind // *Astrophysical Journal*. 2016. V. 825. № 2. 121. <https://doi.org/10.3847/0004-637X/825/2/121>
22. *Verigin M.I., Tátrallyay 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 // *Advances in Space Research*. 2006. V. 37. № 3. P. 515–521. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.03.042>
23. *Shue J.-H., Song P., Russell C.T. et al.* Magnetopause location under extreme solar wind conditions // *Geophysical Research: Space Physics*. 1998. V. 103. № A8. P. 17691–17700. <https://doi.org/10.1029/98JA01103>
24. *Verigin M.I., Kotova G.A., Slavin J. et al.* Analysis of the 3-D shape of the terrestrial bow shock by interball/magion 4 observations // *Advances in Space Research*. 2001. V. 28. № 6. P. 857–862. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(01\)00502-6](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00502-6)
25. *Ogilvie K.W., Chornay D.J., Fritzenreiter R.J. et al.* SWE, a comprehensive plasma instrument for the WIND spacecraft // *Space Science Reviews*. 1995. V. 71. № 1–4. PP. 55–77. <https://doi.org/10.1007/BF00751326>
26. *Lepping R.P., Acuña M.H., Burlaga L.F. et al.* The WIND magnetic field investigation // *Space Science Reviews*. 1995. V. 71. № 1–4. P. 207–229. <https://doi.org/10.1007/BF00751330>
27. *Shevyrev N.N., Zastenker G.N.* Some features of the plasma flow in the magnetosheath behind quasi-parallel and quasi-perpendicular bow shocks // *Planetary and Space Science*. 2005. V. 53. № 1–3. P. 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2004.09.033>
28. *Riazantseva M.O., Budaev V.P., Zelenyi L.M. et al.* Dynamic properties of small-scale solar wind plasma fluctuations // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2015. V. 373. № 2041. P. 20140146–20140146. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0146>
29. *Greenstadt E.W.* Binary index for assessing local bow shock obliquity // *Geophysical Research*. 1972. V. 77. № 28. P. 5467–5479. <https://doi.org/10.1029/JA077i028p05467>
30. *Formisano V.* Orientation and shape of the Earth's bow shock in three dimensions // *Planetary and Space Science*. 1979. V. 27. № 9. P. 1151–1161. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(79\)90135-1](https://doi.org/10.1016/0032-0633(79)90135-1)
31. *Рязанцева М.О., Рахманова Л.С., Застенкер Г.Н. и др.* Мелкомасштабные флуктуации плазмы солнечного ветра в быстрых и медленных потоках // *Космич. исслед.* 2019. Т. 57. № 6. С. 451–460.
32. *Boldyrev S., Perez J.C.* Spectrum of Kinetic Alfvén Turbulence // *Astrophysical Journal Letters*. 2012. V. 758. № 2. L44.
33. *Šafránková J., Němeček Z., Němec F. et al.* Solar wind density spectra around the ion spectral break // *The Astrophysical Journal*. 2015. V. 803. № 2. 107. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/803/2/107>
34. *Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю.* Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // *Космич. исслед.* 2009. Т. 47. № 2. С. 99–113.