

УДК 523.62-726

## РАЗВИТИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО КАСКАДА ЗА ОКОЛОЗЕМНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ ПРИ СПОКОЙНЫХ УСЛОВИЯХ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

© 2021 г. Л. С. Рахманова<sup>1, \*</sup>, М. О. Рязанцева<sup>1, \*\*</sup>, Г. Н. Застенкер<sup>1</sup>, Ю. И. Ермолаев<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), г. Москва, Россия

\*e-mail: rakhnud@gmail.com

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

Поступила в редакцию 11.03.2021 г.

После доработки 29.03.2021 г.

Принята к публикации 27.05.2021 г.

Пересечение солнечным ветром околоземной ударной волны в ряде случаев приводит к существенным изменениям в развитии турбулентного каскада. Отдельные случаи, исследованные ранее на основе экспериментальных измерений характеристик турбулентности в магнитослое, пока не дали ответа на вопрос, какие факторы оказывают наибольшее влияние на модификацию турбулентного каскада за околоземной ударной волной. В настоящей работе рассмотрены несколько случаев регистрации спектров сжимаемой компоненты флуктуаций в магнитослое на двух разнесенных в пространстве спутниках при спокойных условиях в солнечном ветре, что позволяет оценить влияние границ магнитослоя и топологии ударной волны на динамику турбулентного каскада при движении плазмы за околоземной ударной волной. Показано, что непосредственно за квази перпендикулярной ударной волной в дневной части магнитослоя происходит существенное перераспределение энергии в турбулентном каскаде, затрагивающее магнитогидродинамические масштабы, при этом при дальнейшем распространении плазмы в сторону флангов свойства каскада восстанавливаются. В то же время, за квази параллельной ударной волной изменения характеристик турбулентного каскада при входе плазмы в магнитослой происходят только на субионных масштабах.

DOI: 10.31857/S0016794021050114

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие солнечного ветра (СВ) с магнитосферой Земли приводит к формированию отошедшей околоземной ударной волны (ОЗУВ). Область между ОЗУВ и магнитопаузой – магнитослой (МСЛ) – характеризуется, помимо прочего, более высоким уровнем компрессии плазмы, развитием различных волновых процессов и, как следствие, более высокими по мощности флуктуациями по сравнению с невозмущенным СВ перед ОЗУВ. Важной чертой космической плазмы, характерной и для МСЛ и СВ, является ее турбулентность. Турбулентный каскад в СВ исследовался с момента запуска первых спутников [см. обзоры Alexandrova et al., 2013; Bruno and Carbone, 2013], тогда как активное исследование турбулентности в МСЛ началось сравнительно недавно [например, обзоры Sahraoui et al., 2020; Rakhmanova et al., 2021]. Значительная часть работ по исследованию турбулентности в СВ и МСЛ в последние десятилетия посвящена определению свойств турбулентного каскада на масштабах порядка гирорадиуса протона и менее, на которых важную роль приобретают кинетические процессы и происходит, как считается, нагрев плазмы.

Поскольку характеристики плазмы СВ и ММП существенно модифицируются при пересечении плазмы ОЗУВ, свойства турбулентного каскада также могут изменяться. Статистический анализ характеристик турбулентности плазмы в МСЛ на масштабах вблизи гирорадиуса протона (т.е. при переходе от МГД к кинетическому описанию плазмы) показал их отличие от наблюдений в невозмущенном СВ, а также динамику характеристик турбулентности при распространении плазмы в МСЛ от ОЗУВ к флангам [например, Huang et al., 2017; Рахманова и др., 2018; Rakhmanova et al., 2018; Li et al., 2020]. В частности, по статистическим исследованиям флуктуаций магнитного поля, измеренным на спутниках миссии Cluster [Huang et al., 2017], и флуктуаций потока ионов, измеренным на спутнике Спектр-Р [Рахманова и др., 2018; Rakhmanova et al., 2018], было показано, что в подсолнечной области в МСЛ вблизи ОЗУВ на МГД-масштабах могут наблюдаться спектры, как правило аппроксимируемые степенной функцией  $\sim f^{-1}$  (где  $f$  – частота флуктуаций, измеряемая в системе отсчета плазмы) вместо функции  $f^{-5/3}$ , характерной для развитой Колмогоровской турбулентности в невозмущенном

СВ. При этом указанный эффект становится менее выраженным при удалении от ОЗУВ в сторону магнитопаузы и в сторону флангов. На меньших – субионных – масштабах были показаны различия форм спектров, типичных для плазмы вблизи ОЗУВ и во внутренних областях МСЛ, что может свидетельствовать о различии в процессах диссипации энергии плазмы.

Однако, экспериментальное исследование отдельных событий, проведенное в последние годы [Рахманова и др., 2019; Rakhmanova et al., 2020], а также сравнение наблюдений на различных космических аппаратах, представленных в работах разных авторов [Rakhmanova et al., 2021], выявили различные сценарии модификации турбулентного каскада на ОЗУВ. Рассмотренные случаи наблюдались при различных условиях в СВ, а также при различном расположении спутников за ОЗУВ. Было выдвинуто предположение, что на характеристики турбулентного каскада за ОЗУВ и на его развитие при распространении плазмы в МСЛ могут влиять такие факторы, как тип крупномасштабного течения СВ, взаимная ориентация межпланетного магнитного поля (ММП) и нормали к ОЗУВ и расстояние от точки входа плазмы в МСЛ до подсолнечной точки ОЗУВ. Однако, степень, способ и условия влияния каждого из этих факторов выделить до сих пор не удавалось.

В настоящей работе на основе четырех случаев одновременной регистрации частотных спектров флуктуаций на двух спутниках – космическом аппарате Спектр-Р и одном из спутников миссии Themis – внутри МСЛ проводится анализ динамики характеристик турбулентности плазмы за ОЗУВ при спокойных условиях в СВ. Фиксирование одного из важных факторов – типа набегающего потока СВ – позволило изолированно проанализировать влияние топологии ОЗУВ и расстояния до нее на развитие турбулентного каскада внутри МСЛ.

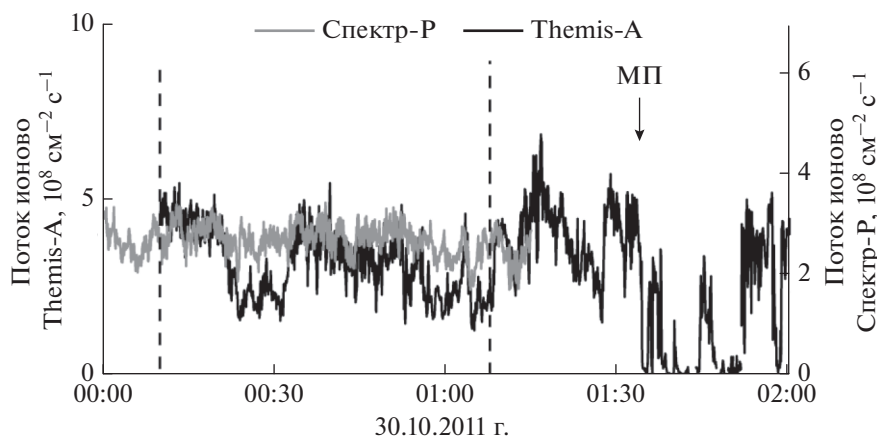
## 2. ДАННЫЕ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА

В работе использовались измерения потока ионов на спутнике Спектр-Р прибором БМСВ [Застенкер и др., 2013; Šafránková et al., 2013] с временным разрешением 0.031 с и модуля магнитного поля на спутниках миссии Themis приборами FGM [Auster et al., 2008] с временным разрешением 0.25 с. Высокое временное разрешение измерений позволяет анализировать флуктуации параметров в диапазоне частот, соответствующем переходу от МГД к кинетическим масштабам. Помимо этого, для проведения сопоставления между парой спутников были использованы измерения плазменных параметров с электростатических анализаторов ESA на спутниках Themis [McFadden et al., 2008] с временным разрешением 4 с. Выбирались периоды времени, когда спутни-

ки располагались на одном фланге МСЛ или на небольшом (в пределах  $20 R_E$ ) расстоянии в подсолнечной области. При этом проверялись условия в набегающем потоке СВ: были отобраны только те события, для которых поток СВ относился к типу “Slow” по каталогу Ермолаева и др. [2009], т.е. к медленному невозмущенному течению СВ. Каталог доступен на интернет-ресурсе (<ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/>). Для анализа отбирались интервалы длительностью не менее 20 мин, в течение которых не наблюдалось больших по амплитуде изменений параметров плазмы и/или модуля магнитного поля, а также поворотов вектора магнитного поля, которые могут свидетельствовать о пересечении плазменных структур.

На первом этапе проводилось сравнение временного хода потока ионов, измеренного на двух спутниках. На рисунке 1 приведен поток ионов, зарегистрированный 30 октября 2011 г. на спутниках Themis-A (черная линия, левая ось ординат) и Спектр-Р (серая линия, правая ось ординат). Взаимное расположение спутников приведено на рис. 2a. Измерения спутника Themis-A сдвинуты на время распространения плазмы – 10 мин. Themis-A находился вблизи подсолнечной части магнитопаузы, пересек ее в  $\sim 1:35$  UT и вошел в магнитосферу. Спектр-Р находился на фланге, на расстоянии  $\sim 25 R_E$  вдоль оси  $X_{GSE}$  ( $GSE$  – солнечная эклиптическая система координат), вдали от обеих границ МСЛ. Углы  $\theta_{BN}$  между локальной нормалью к ОЗУВ в точке входа плазмы в МСЛ и ММП для обоих спутников составляли  $60^\circ$ . Угол  $\theta_{BN}$  вычислялся в точке входа плазмы в МСЛ, определенной с помощью трассировки спутника к ОЗУВ вдоль линий тока, вычисленных с использованием модели Спрайтера [Spreiter et al., 1966]. Подробно методика описана в работе [Shevryev and Zastenker, 2005]. Таким образом, оба спутника находились за квази перпендикулярной ОЗУВ, но на разных расстояниях от подсолнечной точки. Наблюдается хорошее визуальное соответствие временного хода потока ионов на обоих спутниках, что свидетельствует о регистрации на них одного и того же объема плазмы. Вертикальными штриховыми линиями обозначен временной интервал длительностью около часа, использованный для дальнейшего анализа.

Для определения характеристик турбулентности использовался Фурье-анализ. При этом перед вычислением частотных спектров флуктуации параметров были нормированы на среднее значение соответствующего параметра на всем интервале. Указанная нормировка проводилась для сравнения мощности флуктуаций различных параметров. Следует отметить, что как флуктуации потока ионов, так и флуктуации модуля магнитного поля представляют собой флуктуации сжа-



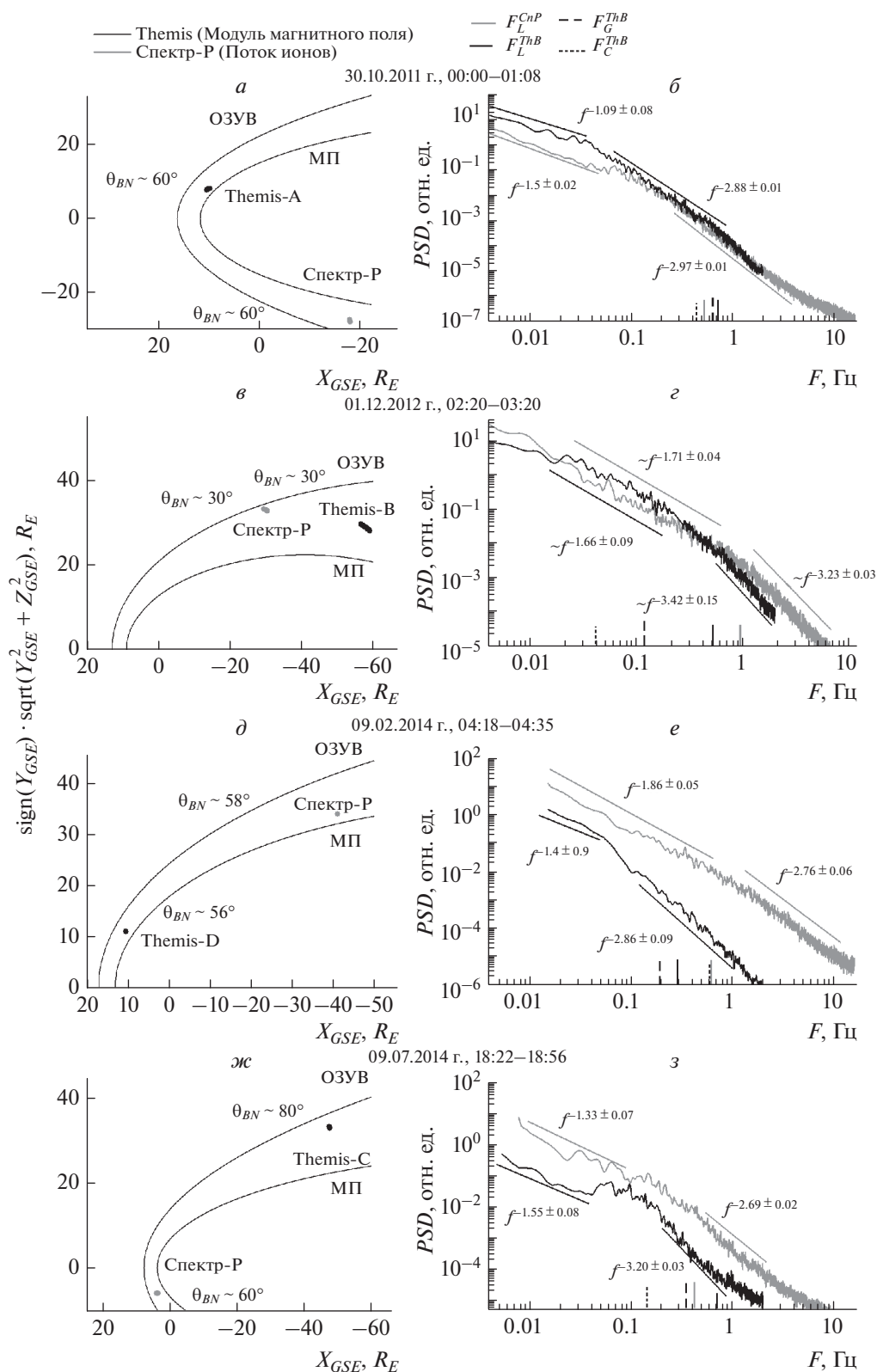
**Рис. 1.** Временной ход потока ионов в магнитослое, измеренный на спутнике Themis-A (черная линия, левая ось ординат) и на спутнике Спектр-Р (серая линия, правая ось ординат). Вертикальные штриховые линии обозначают границы интервала, выбранного для спектрального анализа.

тия [например, Alexandrova et al., 2008], и, соответственно, сравнение характеристик их частотных спектров физически оправдано. Подробнее возможность сравнения спектров флуктуаций потока ионов и модуля магнитного поля рассмотрена в работе [Rakhmanova et al., 2020], а непосредственное сравнение спектров разных величин на одном космическом аппарате приведены в работах [Chen, 2016; Chen and Boldyrev, 2017; Roberts et al., 2017]. На рисунке 2б приведены спектры флуктуаций потока ионов на спутнике Спектр-Р (серая линия) и модуля магнитного поля на спутнике Themis-A (черная линия). Оба спектра могут быть аппроксимированы двумя степенными функциями, сменяющимися друг друга на некоторой частоте (частоте излома). При помощи линейной аппроксимации были определены показатели степенных функций (т.н. наклоны спектров) на МГД и кинетических масштабах (на частотах меньше и больше излома, соответственно). Спектр флуктуаций модуля магнитного поля, зарегистрированных спутником Themis-A, характеризуется наклоном  $-1.09 \pm 0.08$  на МГД-масштабах и  $-2.88 \pm 0.01$  на кинетических масштабах. Спектр флуктуаций потока ионов, зарегистрированных ниже по течению спутником Спектр-Р, характеризуется наклоном  $-1.50 \pm 0.02$  на МГД и  $-2.97 \pm 0.01$  на кинетических масштабах, соответственно. Хорошо видно, что в подсолнечной области свойства турбулентного каскада на МГД-масштабах сильно отличаются от предсказаний теории развитой турбулентности, то есть не следуют Колмогоровскому скейлингу, несмотря на удаленность спутника от ОЗУВ. На кинетических масштабах наклон спектра близок к типичному значению  $-(2.7-2.9)$ , наблюдающемуся в среднем в статистических исследованиях турбулентности в МСЛ [Huang et al., 2014;

Rakhmanova et al., 2016], а также в СВ [Chen et al., 2012; Riazantseva et al., 2015], и близкому к некоторым теоретическим предсказаниям [например, Boldyrev and Perez, 2012]. При удалении плазмы от подсолнечной области наклон спектра на МГД-масштабах приближается к Колмогоровскому скейлингу, при этом наблюдается незначительное укрупнение кинетической части спектра. Как правило, считается, что частота излома спектра связана с доминирующим процессом диссипации энергии и соответствует определенной характерной плазменной частоте. Однако, однозначно определить, какой частоте соответствует излом до сих пор не удалось [например, Šafránková et al., 2016]. Определение положения частоты излома выходит за рамки данной работы, однако характерные частоты приведены для справки для каждого спектра на рис. 2 вдоль оси абсцисс. Линией из точек обозначена гирочастота протона  $F_C$ , частоты  $F_G = V/2\pi r$  и  $F_L = V/2\pi L$  (где  $V$  – потоковая скорость плазмы), определяемые ларморовским радиусом  $r$  и инерционной длиной  $L$  протона, обозначены штриховой и сплошной линией, соответственно. Черным цветом обозначены частоты для спутника Themis, серым – для спутника Спектр-Р. Поскольку на спутнике Спектр-Р измерения магнитного поля отсутствуют, для него приведена только последняя из перечисленных частот.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Аналогичным образом были проанализированы еще три события с различной топологией ОЗУВ и с различной локализацией космических аппаратов внутри МСЛ. При этом для каждого события проверялось визуальное соответствие временного хода потока ионов на двух спутниках,



**Рис. 2.** Слева – расположение космических аппаратов, справа – спектры флуктуаций потока ионов (серая линия) и модуля магнитного поля (черная линия) для четырех рассмотренных событий.

**Таблица 1.** Характеристики спектров флуктуаций потока ионов по измерениям на спутнике Спектр-Р и модуля магнитного поля по измерениям на спутнике Themis, расположение спутников и значение угла  $\theta_{BN}$  для рассмотренных событий

Событие	Спутник	Расположение	Угол $\theta_{BN}$ , °	Наклон спектра на МГД-масштабах	Наклон спектра на кинетических масштабах
30.10.2011 г.	Themis	МП, п\с	60	$-1.09 \pm 0.08$	$-2.88 \pm 0.01$
	Спектр-Р	Центр, ф	60	$-1.50 \pm 0.02$	$-2.97 \pm 0.08$
01.12.2012 г.	Themis	Центр, ф	30	$-1.66 \pm 0.09$	$-3.42 \pm 0.15$
	Спектр-Р	ОЗУВ, ф	30	$-1.71 \pm 0.04$	$-3.23 \pm 0.03$
09.02.2014 г.	Themis	МП, п\с	56	$-1.4 \pm 0.9$	$-2.86 \pm 0.09$
	Спектр-Р	МП, ф	58	$-1.87 \pm 0.05$	$-2.76 \pm 0.06$
09.07.2014 г.	Themis	Центр, ф	80	$-1.55 \pm 0.08$	$-3.20 \pm 0.03$
	Спектр-Р	Центр, п\с	60	$-1.33 \pm 0.07$	$-2.69 \pm 0.02$

чтобы исключить регистрацию принципиально разных объемов плазмы. На рисунках 2в, 2д, 2ж приведены расположения пар спутников в рассматриваемых событиях, на рис. 2г, 2е, 2з – сравнение спектров флуктуаций параметров в указанных событиях, соответственно. Черными линиями обозначены спектры флуктуаций модуля магнитного поля по измерениям спутников Themis, серыми – спектры флуктуаций потока ионов по измерениям спутника Спектр-Р. Угол  $\theta_{BN}$ , характеризующий тип ОЗУВ, указан на панелях слева с расположением для каждого космического аппарата. Результаты аппроксимации наклонов спектров на МГД и кинетических масштабах приведены на панелях справа рядом с соответствующей кривой. Особенности расположения спутников для каждого события, а также характеристики спектров флуктуаций, приведены в табл. 1. В графе “Расположение” буквами “ф” и “п/с” отмечены фланговые и подсолнечные области, соответственно, “Центр” обозначает удаленность от границ МСЛ, “МП” и “ОЗУВ” означает близость к магнитопаузе или ОЗУВ, соответственно. При этом под расположением вблизи границ понимается ситуация, когда ее пересечение происходит в пределах 1 ч до\после анализируемого интервала, в противном случае говорится об удаленности спутника от границ.

Сравнивая характеристики спектров флуктуаций параметров для четырех событий при различном взаимном расположении спутников можно видеть, что три события, в которых один из спутников находился в подсолнечной области (события 1, 3 и 4), наблюдаются за квази перпендикулярной ОЗУВ и характеризуются заметным отклонением спектров на МГД-масштабах от Колмогоровского скейлинга. При этом, даже вблизи подсолнечной области спектры в двух из трех случаев отличаются от спектров с показателем  $-1$ , отмеченных в статистическом исследовании [Huang et al., 2017]. Поскольку авторы указан-

ной работы рассматривали не флуктуации сжатия, а флуктуации альвеновской компоненты, то полученное различие может свидетельствовать о разнице свойств сжимаемой и несжимаемой компонент флуктуаций вблизи ОЗУВ. Статистический анализ Рахмановой и др. [2018] показал отличие спектров флуктуаций потока ионов от Колмогоровского вида только в областях вблизи ОЗУВ, тогда как в середине МСЛ и вблизи магнитопаузы спектры имели наклоны близкие к  $-5/3$  на МГД-масштабах. В настоящей работе отклонения от Колмогоровского вида спектров в подсолнечной области наблюдаются как в середине МСЛ (событие 09.07.2014 г.), так и вблизи магнитопаузы (события 30.10.2011 г. и 09.02.2014 г.). Полученное отличие от результатов статистического исследования вероятней всего обусловлено тем, что большая часть рассматриваемых в работе [Рахманова и др., 2018] данных относилась к фланговому МСЛ.

Во фланговых областях все события за квази перпендикулярной ОЗУВ относятся к середине МСЛ или области вблизи магнитопаузы. Для указанных событий характерны спектры, близкие к Колмогоровским на МГД-масштабах. Из чего можно сделать вывод, что при движении плазмы от подсолнечной области к флангам турбулентность развивается, и, в результате, на флангах вдали от ОЗУВ наблюдаются спектры, близкие к предсказаниям теории развитой турбулентности на МГД-масштабах. Этот результат хорошо согласуется с результатами статистического исследования [Рахманова и др., 2018].

События, наблюдающиеся в подсолнечной области за квази перпендикулярной ОЗУВ, характеризуются наклонами спектров на кинетических масштабах, характерными для плазмы МСЛ и СВ – от  $-2.9$  до  $-2.7$ . При этом для двух из трех событий (30.10.2011 г. и 09.02.2014 г.) характерно сохранение указанного наклона при движении

плазмы к флангам, т.к. наклоны спектров совпадают с учетом погрешностей их определения. Для одного из событий – 09.07.2014 г. – наблюдается заметное укрупнение спектра на кинетических масштабах при распространении плазмы в МСЛ – наклон изменяется от  $-2.69 \pm 0.02$  до  $-3.20 \pm 0.03$ . Однако соответствующий спектр на рис. 2з демонстрирует присутствие широкого пика на частоте, близкой к циклотронной частоте протона, что свидетельствует о присутствии локальных волновых явлений, которые могут приводить к дополнительной диссипации энергии в этой области. Таким образом, при отсутствии локальных источников дополнительной диссипации энергии турбулентный каскад на кинетических масштабах не подвержен изменению при движении плазмы за квази перпендикулярной ОЗУВ от подсолнечной области к флангу.

Одно из четырех событий, представленное на рис. 2в, 2г, относится к магнитослою за квази параллельной ОЗУВ. Указанное событие более подробно рассматривалось в работе (Rakhmanova et al., 2020), однако в данном случае оно интересно для сравнения свойств спектров флуктуаций за квази параллельной и квази перпендикулярной ОЗУВ. Как видно, оба спутника находились во фланговой области МСЛ, один вблизи ОЗУВ, другой – дальше по течению в середине МСЛ. Оба спектра имеют Колмогоровский вид на МГД-масштабах и большой по модулю наклон на кинетических масштабах (по сравнению с наблюдаемыми в среднем для МСЛ и СВ) –  $-3.42 \pm 0.15$  вблизи ОЗУВ и  $-3.23 \pm 0.03$  в середине МСЛ. Таким образом, при спокойных условиях в СВ за квази параллельной ОЗУВ не наблюдается отличий спектров от предсказаний теорий развитой турбулентности на флангах МСЛ. При этом наблюдается существенное укрупнение спектров, свидетельствующее, вероятно, об увеличенном темпе диссипации энергии, обусловленной процессами, вовлеченными в локальный объем плазмы, причем вблизи ОЗУВ темпы диссипации несколько выше, чем вдали от нее. Полученный результат соответствует представленным ранее на основе статистики выводам [Rakhmanova et al., 2020].

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Анализ четырех событий регистрации турбулентных флуктуаций сжатия в МСЛ в двух разных точках позволил выявить основные черты модификации турбулентного каскада на ОЗУВ и его дальнейшей динамики при спокойных условиях в набегающем потоке СВ.

1) За квази перпендикулярной ОЗУВ наблюдается существенное отклонение спектров флуктуаций на МГД-масштабах от Колмогоровского вида и восстановление Колмогоровского скейлинга

спектров при распространении плазмы в сторону флангов вдали от ОЗУВ; при этом, как правило, наклоны спектров больше по модулю, чем наклон  $-1$ , полученный статистически для альвеновских флуктуаций в подсолнечной области МСЛ, что может свидетельствовать о различии в модификации сжимаемой и несжимаемой компоненты флуктуаций на ОЗУВ.

2) За квази перпендикулярной ОЗУВ на кинетических масштабах, как правило, наблюдаются спектры с характерным для флуктуаций плазмы и магнитного поля СВ и МСЛ наклоном – (2.7–2.9), при этом это значение сохраняется при распространении плазмы от подсолнечной области к флангам при отсутствии локальных волновых процессов, которые могут привести к усилению диссипации и укрупнению спектра.

3) За квази параллельной ОЗУВ во фланговых областях спектры соответствуют Колмогоровским вне зависимости от расстояния до ОЗУВ, при этом на кинетических масштабах, по-видимому, увеличиваются темпы диссипации, что приводит к существенному укрупнению спектров на различных расстояниях от ОЗУВ и от подсолнечной области.

Проведенное исследование впервые наглядно показывает, что при спокойных условиях в СВ за квази перпендикулярной ОЗУВ характеристики турбулентного каскада плазмы существенно изменяются на МГД-масштабах, при этом сохраняясь на субионных масштабах. Последующее выделение интервалов с одинаковой топологией ОЗУВ и расположением спутников, но различными условиями в набегающем потоке СВ необходимо для определения и разделения вкладов топологии ОЗУВ и характеристик СВ на развитие турбулентности плазмы в МСЛ.

#### 5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарности своим коллегам из Института космических исследований (ИКИ РАН), Научно-производственного объединения им. С.А. Лавочкина (НПО Лавочкина) и Карлова университета в Праге (г. Прага, Чехия) за помощь в разработке, отладке, калибровке, полетном контроле, а также за сбор, передачу и первичную обработку научной информации с прибора БМСВ.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 19-02-00177 а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Застенкер Г.Н., Шафранкова Я., Немечек З. и др. Быстрые измерения параметров солнечного ветра с

- помощью прибора БМСВ // *Космич. исслед.* Т. 51. № 2. С. 88–99. 2013.
- Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // *Космич. исслед.* Т. 47. № 2. С. 99–113. 2009.
- 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.* Т. 58. № 6. С. 749–758. 2018.
- Рахманова Л.С., Рязанцева М.О., Застенкер Г.Н., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Чесалин Л.С. Влияние характеристик турбулентности плазмы солнечного ветра на свойства турбулентного каскада в магнитослое // *Космич. исслед.* Т. 57. № 6. С. 461–468. 2019.
- Alexandrova O., Lacombe C., Mangeney A. Spectra and anisotropy of magnetic fluctuations in the Earth's magnetosheath: cluster observations // *Ann. Geophys.* V. 26. P. 3585–3596. 2008.  
<https://doi.org/10.5194/angeo-26-3585-2008>
- Alexandrova O., Chen C.H.K., Sorriso-Valvo L., Horbury T.S., Bale S.D. Solar Wind Turbulence and the Role of Ion Instabilities // *Space Science Reviews.* V. 178. P. 101–139. 2013.
- Boldyrev S., Perez J.C. Spectrum of kinetic alfvén turbulence // *Astrophys. J. Lett.* V. 758. № 2. L44. 2012.  
<https://doi.org/10.1088/2041-8205/758/2/L44>
- Bruno R., Carbone V. The solar wind as a turbulence laboratory // *Living Reviews in Solar Physics.* V. 10. 2013.  
<https://doi.org/10.12942/lrsp-2013-2>
- Chen C.H.K., Salem C.S., Bonnel J.W., Moze F.S., Bale S.D. Electron density fluctuation spectrum of solar wind turbulence between ion and electron scales // *Phys. Rev. Lett.* V. 109. № 3. P. 035001. 2012.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.035001>
- Chen C.H.K. Recent progress in astrophysical plasma turbulence from solar wind observations // *J. Plasma Phys.* V. 82. ID. 535820602. 2016.  
<https://doi.org/10.1017/S0022377816001124>
- Chen C.H.K., Boldyrev S. Nature of kinetic scale turbulence in the Earth's magnetosheath // *Astrophys. J.* 842, 122. 2017.  
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa74e0>
- Huang S.Y., Sahraoui F., Deng X.H., He J.S., Yuan Z.G., Zhou M., Pang Y., Fu H.S. Kinetic turbulence in the terrestrial magnetosheath: cluster observations // *Astrophys. J.* V. 789. L28. 2014.  
<https://doi.org/10.1088/2041-8205/789/2/L28>
- Huang S.Y., Hadid L.Z., Sahraoui F., Yuan Z.G., Deng X.H. On the existence of the Kolmogorov inertial range in the terrestrial magnetosheath turbulence // *Astrophys. J. Lett.* V. 836. № 1. L10. 2017.  
<https://doi.org/10.3847/2041-8213/836/1/L10>
- Li H., Jiang W., Wang C., Verscharen D., Zeng C., Russel C.T., Giles B., Burch J.L. Evolution of the Earth's magnetosheath turbulence: a statistical study based on MMS observations // *Astrophys. J.* V. 898. L43. 2020.  
<https://doi.org/10.3847/2041-8213/aba531>
- Rakhmanova L., Riazantseva M., Zastenker G. Plasma fluctuations at the flanks of the Earth's magnetosheath at ion kinetic scales // *Ann. Geophys.* V. 34. P. 1011–1018. 2016.
- 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.* V. 123. P. 5300–5314. 2018.  
<https://doi.org/10.1029/2018JA025179>
- Rakhmanova L., Riazantseva M., Zastenker G., Yermolaev Y., Lodkina I. Dynamics of plasma turbulence at Earth's bow shock and through the magnetosheath // *Astrophys. J.* V. 901. ID 30. 2020.  
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/abae00>
- Rakhmanova L., Riazantseva M., Zastenker G. Plasma and magnetic field turbulence in the Earth's magnetosheath at ion scales // *Front. Astron. Space Sci.* V. 7. ID. 616635. 2021.  
<https://doi.org/10.3389/fspas.2020.616635>
- Riazantseva M.O., Budaev V.P., Zelenyi L.M., Zastenker G.N., Pavlos G.P., Šafránková J., Němeček Z., Přech L., Němec F. Dynamic properties of small scale solar wind plasma fluctuations // *Philosophical Transactions of the Royal Society A.* V. 373. 20140146. 2015.  
<https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0146>
- Roberts O.W., Narita Y., Li X., Escoubet C.P., Laakso H. Multipoint analysis of compressive fluctuations in the fast and slow solar wind // *J. Geophys. Res. Space Phys.* V. 122. P. 6940–6963. 2017.  
<https://doi.org/10.1002/2016JA023552>
- Šafránková J., Němeček Z., Přech L. et al. Fast Solar Wind Monitor (BMSW): Description and First Results // *Space Science Reviews.* V. 175. P. 165–182. 2013.
- Šafránková J., Němeček Z., Němec F., Přech L., Chen C.H.K., Zastenker G.N. Power spectral density of fluctuations of bulk and thermal speeds in the solar wind // *Astrophys. J.* V. 825. P. 121.  
<https://doi.org/10.3847/0004-637X/825/2/121>
- Sahraoui F., Hadid L., Huang S. Magnetohydrodynamic and kinetic scale turbulence in the near-Earth space plasmas: a (short) biased review // *Rev. Mod. Phys.* V. 4. ID. 4. 2020.  
<https://doi.org/10.1007/s41614-020-0040-2>
- Shevyrev N.N., Zastenker G.N. Some features of the plasma flow in the magnetosheath behind quasi-parallel and quasi-perpendicular bow shocks // *Planet. Space Sci.* V. 53. P. 95–102. 2005.  
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2004.09.033>
- Spreiter J.R., Summers A.L., Alksne A.Y. Hydromagnetic flow around the magnetosphere // *Planet. Space Sci.* V. 14. P. 223–253. 1966.  
[https://doi.org/10.1016/0032-0633\(66\)90124-3](https://doi.org/10.1016/0032-0633(66)90124-3)