

УДК 523.62-726

СПЕКТРЫ ФЛУКТУАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ВБЛИЗИ ФРОНТА УДАРНОЙ ВОЛНЫ

© 2024 г. О.В. Сапунова¹*, Н.Л. Бородкова¹, Ю.И. Ермолаев¹, Г.Н. Застенкер¹¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия* *sapunova_olga@mail.ru*

Поступила в редакцию 30.03.2023 г.

После доработки 01.06.2023 г.

Принята к публикации 05.06.2023 г.

Исследуются характеристики спектров мощности флуктуаций плотности протонов и альфа-частиц вблизи фронта межпланетной и околоземной ударной волны. Были посчитаны частоты излома спектров мощности флуктуаций концентрации протонов и альфа-частиц перед и за рампом околоземной ударной волны (ОЗУВ) и межпланетной ударной волны (МУВ). Для возмущенного солнечного ветра за рампом МУВ частота излома спектра флуктуаций протонов оказалась заметно выше (в среднем 1.3 Гц), чем в невозмущенной области (~0.8–1.0 Гц), что объясняется увеличением как скорости, так и концентрации частиц. В случае альфа-частиц частота излома спектра флуктуаций за фронтом МУВ также повышалась – почти в два раза (от 0.7 до 0.12 Гц). Показано, что среднее значение частоты излома спектров протонов за рампом ОЗУВ меньше (0.6 Гц), чем в солнечном ветре (1.0 Гц), ввиду меньшей скорости. Для альфа-частиц этот эффект статистически не был обнаружен из-за увеличения концентрации (0.11 Гц для обеих областей) в случае ОЗУВ.

DOI: 10.31857/S0023420624010018

ВВЕДЕНИЕ

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. Кинетические процессы начинают играть важную роль на масштабах порядка гирорадиуса протона (обычно $\leq 10^2$ км), где происходит диссипация энергии и, как следствие, нагрев плазмы [1]. Таким образом, исследование турбулентного каскада на масштабах порядка и менее гирорадиуса протона по измерениям на космических аппаратах (КА) представляет интерес для понимания процессов нагрева в бесстолкновительной плазме.

Флуктуации параметров плазмы вблизи фронта ударной волны обычно исследовались по данным магнитного поля и полного потока частиц на пространственных масштабах более величины ионного гирорадиуса [2]. В настоящей работе в качестве исследуемых параметров были взяты: абсолютная концентрация протонов и альфа-частиц, относительная концентрация альфа-частиц (отношение концентрации альфа-частиц к концентрации протонов), а также полный поток ионов солнечного ветра.

Была предпринята попытка определить частоту перегиба спектра флуктуаций ионов, где наклон спектра перестает быть колмогоровским ($\sim k^{-5/3}$) [3] и увеличивается.

До запуска спутника «Спектр-Р» изучение спектров флуктуаций параметров плазмы на кинетических масштабах почти не проводилось, за редким исключением в солнечном ветре [4, 5]. С запуском прибора Быстрый монитор солнечного ветра (БМСВ) на спутнике «Спектр-Р» [6, 7] была получена возможность систематического измерения параметров плазмы с разрешением 0.031 с для полного потока, а для параметров плазмы (скорости, температуры, концентрации) – 1.5 с, что позволило изучить спектры флуктуаций параметров плазмы на кинетических масштабах.

Исследования турбулентности проводились с использованием данных прибора БМСВ по потоку плазмы в работах [8, 9] для солнечного ветра и для магнитослоя [10–13]. В нашей работе мы выделили два сорта ионов – протоны и альфа-частицы – для определения и сравнения характеристик их спектров флуктуаций. Протоны составляют 90% потока солнечного ветра, однако альфа-частицы вносят

существенный вклад в процессы перераспределения энергии и возникновение неустойчивостей на фронте ударной волны [14–18].

Одним из исследуемых параметров в настоящей работе было положение излома спектра, которое показывает переход от магнитогидродинамических (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 [19, 20]) или гирорадиусу протона R (флуктуации определяются каскадом альфвеновских флуктуаций [21, 22]). 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; $\omega_i = (4\pi n_i/m_i)^{1/2}$ – плазменная частота иона.

К сожалению, ввиду отсутствия данных магнитного поля с борта КА «Спектр-Р» вычисление гирорадиуса протона для событий пересечения ОЗУВ в большинстве случаев не может быть произведено с необходимой точностью. В связи с этим сравнение со спектрами флуктуаций магнитного поля в настоящей работе не проводится.

Статья организована следующим образом. Сначала приводится методика обработки данных с подробными примерами рассмотрения спектров как при пересечении МУВ, так и ОЗУВ. Обосновывается выбор данных для статистического анализа и указываются технические ограничения обработки (как приборные, так и программные). Затем приводятся гистограммы распределения полученных значений: частот излома для невозмущенной и возмущенной плазмы до и после фронта ударной волны, наклона спектра в невозмущенном солнечном ветре и сравнение этого показателя с теоретическими оценками.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

В работе использовались данные прибора БМСВ спутника «Спектр-Р» [6, 7]. За 2011–2019 гг. прибором было зарегистрировано 57 межпланетных ударных волн, а также множество пересечений ОЗУВ, из которых 12 и 65 событий соответственно были использованы в данном исследовании. Для всех событий были определены скорость, температура и концентрация протонов, а параметры ионов He^{++} были вычислены для событий, в которых скорость и температура протонов были не слишком высоки (этот вопрос будет подробнее рассмотрен в описании рис. 1). По этим данным были построены спектры флуктуаций абсолютной

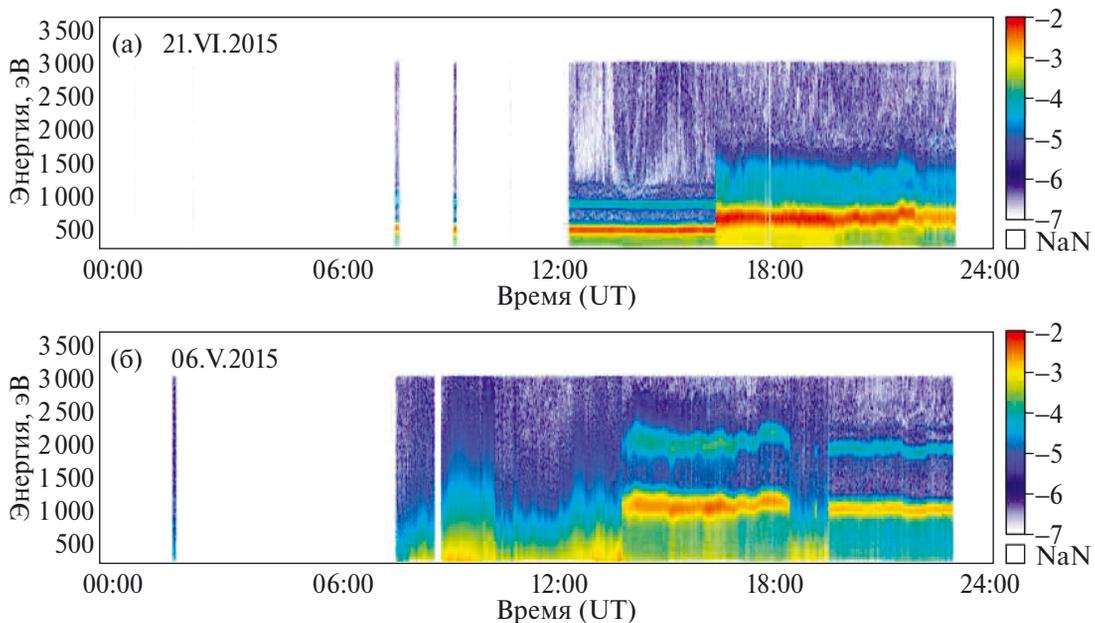


Рис. 1. Спектрограммы пересечения: а – фронта МУВ 21.VI.2015; б – фронта ОЗУВ для события 06.V.2015. По оси абсцисс отложено время в UT в течение одних суток, по оси ординат – энергия запирающей сетки. Повышение концентрации потока ионов показано шкалой насыщенности цвета.

концентрации обоих сортов частиц и относительной концентрации альфа-частиц.

Пример регистрации пересечения фронта МУВ представлен на рис. 1а. В 16:31 УТ прибор зарегистрировал увеличение скорости, концентрации и температуры плазмы солнечного ветра. На спектрограмме отчетливо видны два потока частиц с максимумами на разных уровнях энергии — нижний (~ 500 В) соответствует протонам, верхний (~ 1000 В) — альфа-частицам. По положению этих максимумов определяется переносная скорость каждого сорта частиц, что позволяет вычислить концентрацию протонов и альфа-частиц, так как полный поток также известен. Параметры солнечного ветра перед ударным фронтом были следующие: концентрация протонов 13 см^{-3} , скорость потока плазмы 292 км/с ; температура протонов 1.4 эВ . После прохождения фронта спектральная линия протонов уширяется из-за повышения температуры до 8.9 эВ , а уровень энергии потока ионов повышается ввиду роста скорости до 349 км/с . При этом спектральная линия дважды ионизированного гелия также расширяется, однако отличить ее от линии протонов все еще возможно. Концентрация альфа-частиц в данном событии увеличилась с 1.2 до 3.6 см^{-3} , однако относительная концентрация почти не изменилась ввиду роста концентрации протонов также в три раза до 40 см^{-3} .

На рис. 1б показано пересечение спутником фронта ОЗУВ. Пересечение было многократным, первое — в 13:59 УТ (выход из магнитослоя в солнечный ветер). Так как в переходной области температура протонов и альфа-частиц обычно сильно выше, чем в солнечном ветре, то это может приводить к регистрации широкого интегрального спектра ионов, на котором визуально почти не различимы потоки протонов и альфа-частиц, как в данном случае. Скорость, наоборот, падает в переходной области, что приводит к снижению уровней энергий потоков ионов.

Для построения спектров флуктуаций брались интервалы длительностью $10\text{--}15$ мин до/после пересечения ударной волны. Рассматриваемый параметр нормировался на среднее значение в течение этого интервала. Всего было отобрано 20 пересечений МУВ и 65 ОЗУВ. Выборка была основана на технической возможности обработать потоки протонов и альфа-частиц отдельно, так как при температуре $T_p > 50 \text{ эВ}$ спектры ионов накладываются друг на друга и при высокой скорости протонов $V_p \geq 600 \text{ км/с}$ спектр альфа-частиц выходит за энергетический диапазон прибора.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Индивидуальные спектры

Пример рассматриваемого спектра приведен на рис. 2 для 01.XI.2011. На верхней панели (а) представлен полный поток ионов солнечного ветра, а также плотность протонов. Ниже, на панели (б), приведены абсолютная и относительная плотность альфа-частиц. Буквами в–д обозначены панели со спектрами флуктуаций: (в) — потока ионов и плотности протонов, (г) — абсолютной плотности альфа-частиц, (д) — относительной плотности альфа-частиц.

На панели (в) наклон спектра флуктуаций плотности протонов соответствует примерно -2.4 и хорошо совпадает с наклоном спектра флуктуаций полного потока -2.0 . Отметим, что частота излома спектра оказывается выше разрешаемой нашими измерениями частоты — 0.69 Гц против 0.67 Гц . При этом частота излома спектра концентрации альфа-частиц (панель (г)) примерно на порядок меньше — 0.05 Гц , и находится в диапазоне наших измерений. Точка перегиба спектра концентрации альфа-частиц выделяется слабо. Точка перегиба спектра относительной концентрации альфа-частиц была взята из панели (г) по частоте концентрации альфа-частиц ввиду того, что они вносят больший вклад в мощность флуктуаций данного параметра.

На рис. 3 приведены параметры и спектры их флуктуаций для возмущенной области за фронтом МУВ. Из панелей (а), (б) видно увеличение абсолютных значений потока плазмы, концентрации протонов и альфа-частиц. Однако относительная концентрация изменилась слабо ввиду синхронного роста абсолютной концентрации. Этот эффект был подробно рассмотрен в работе [23].

Частота излома спектра флуктуаций протонов после прохождения фронта МУВ выросла еще больше (с 0.69 до 1.6 Гц) и стала значительно превосходить возможности временного разрешения данного параметра, однако по спектру флуктуаций потока ионов можно наблюдать увеличение показателя спектра от -1.8 до -1.9 , что становится указанием на верность вычислений. Частота излома спектра флуктуаций концентрации альфа-частиц также выросла (в два раза — с 0.05 до 0.11 Гц), однако осталась в зоне измерений. На графике спектра четко виден излом вблизи предсказанной частоты, за ним следует увеличение показателя спектра с -1.2 до -3.4 . Спектры флуктуаций относительной концентрации демонстрируют

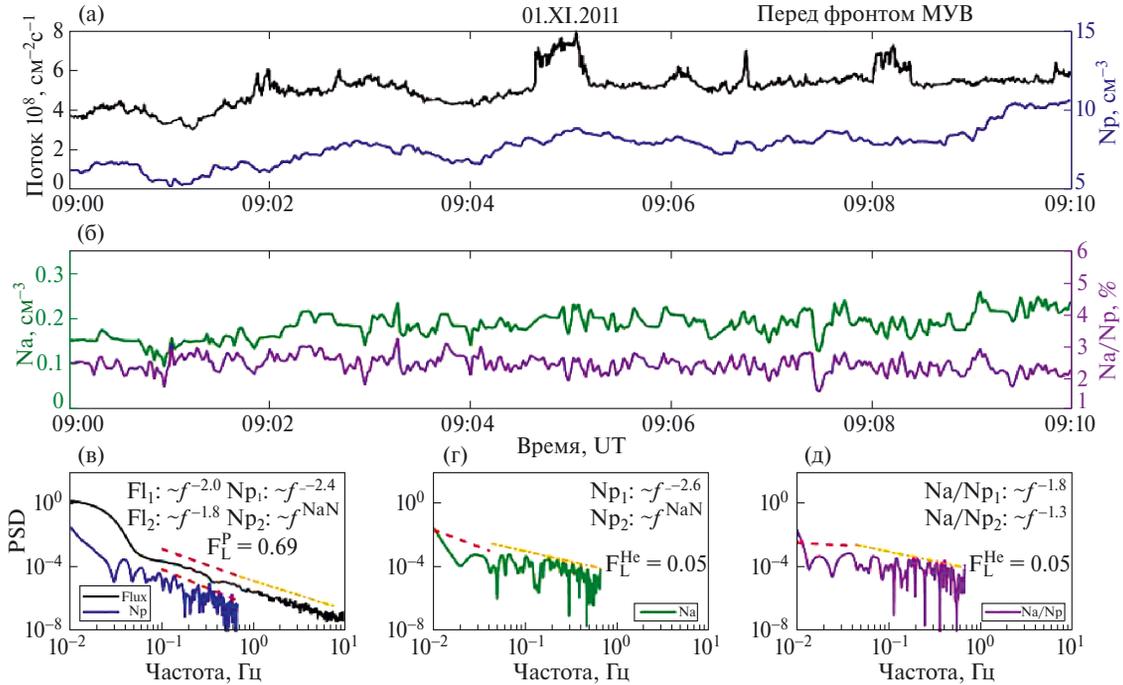


Рис. 2. Параметры и спектры флуктуаций параметров ионов в невозмущенной области перед фронтом МУВ: а – полный поток ионов и концентрация протонов N_p ; б – концентрация альфа-частиц Na и относительная концентрация Na/N_p ; в – спектры мощности потока ионов и концентрации протонов; г – спектры мощности концентрации альфа-частиц; д – спектры мощности относительной концентрации альфа-частиц. На панелях в–д обозначены следующие величины: показатель степенной функции $\sim f^a$ для потока, концентрации протонов, концентрации альфа-частиц и относительной концентрации альфа-частиц. Индексами 1 и 2 обозначены показатели степени до и после излома: Fl_1 – для потока, N_p – протонов, Na – альфа-частиц. F_L^P – частота излома по протонам, F_L^{He} – по альфа-частицам.

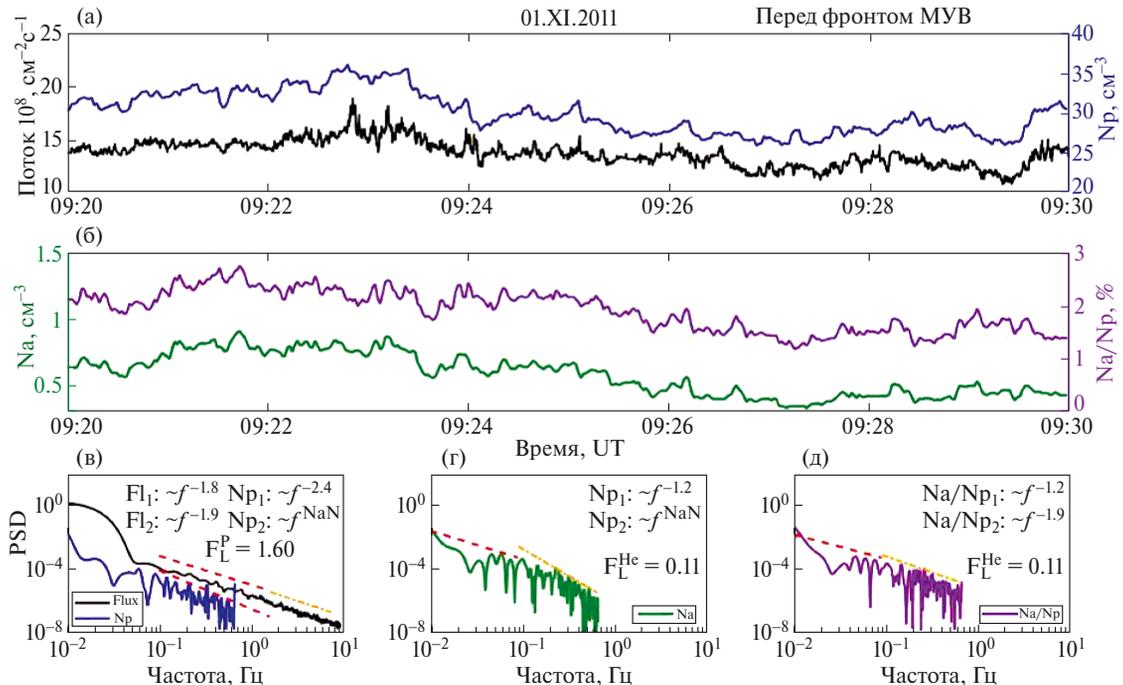


Рис. 3. Параметры и спектры флуктуаций параметров ионов в возмущенной области за фронтом МУВ. Обозначения как на рис. 2.

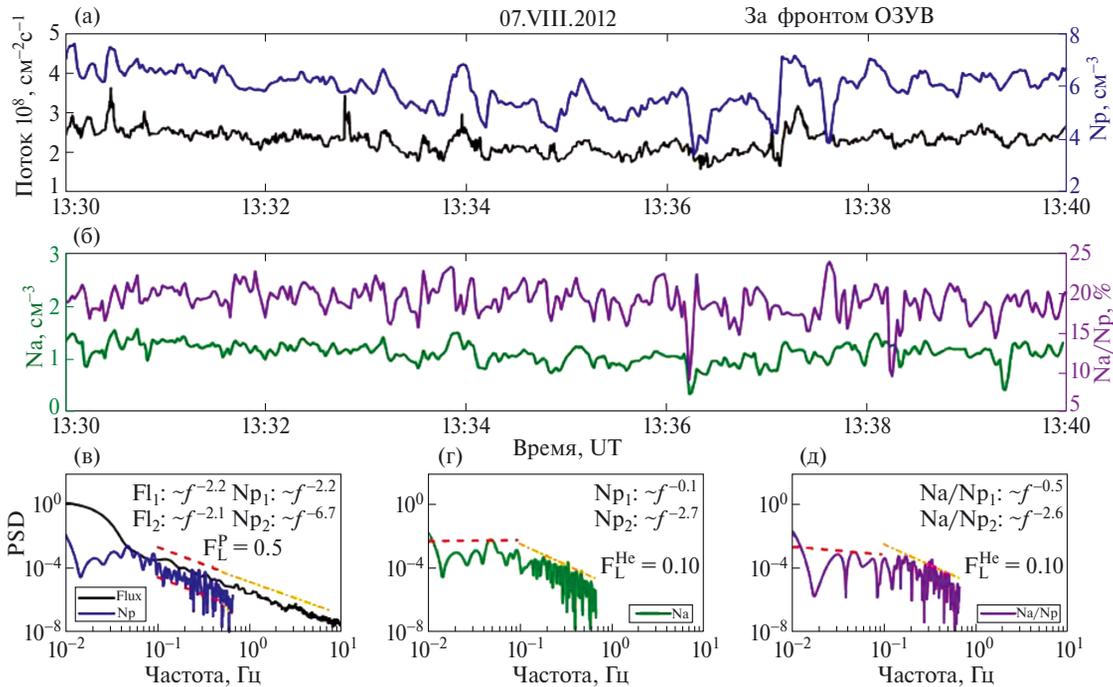


Рис. 4. Параметры и спектры флуктуаций ионов в возмущенной области за фронтом МУВ. Обозначения как на рис. 2.

меньшее увеличение (всего до -1.9). Данный эффект может быть связан с влиянием протонов, мощность флуктуаций которых за фронтом МУВ сравнима с мощностью флуктуаций альфа-частиц, что видно из панели (v).

Переходя к рис. 4, мы можем видеть аналогичный набор панелей. В данном случае приведены параметры и спектры флуктуаций концентрации ионов в переходной области за фронтом ОЗУВ. За фронтом ОЗУВ следует прежде всего

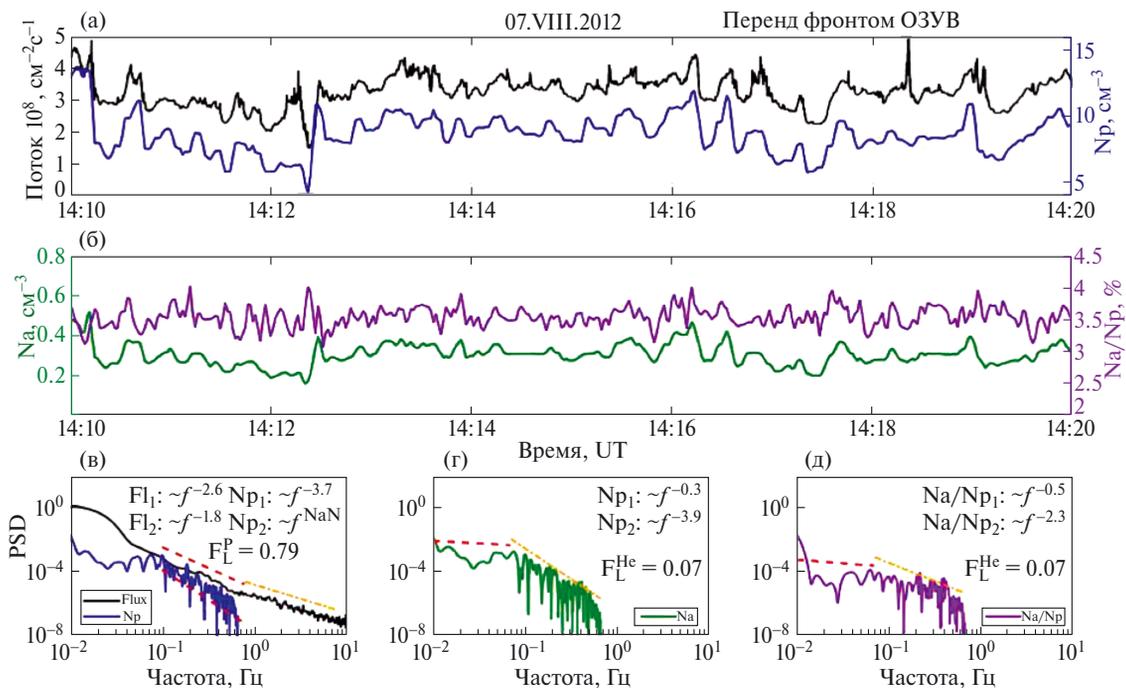


Рис. 5. Параметры и спектры флуктуаций ионов в возмущенной области за фронтом МУВ. Обозначения как на рис. 2.

отметить малую, по сравнению с частотой в невозмущенной плазме, частоту излома для спектра флуктуации плотности протонов. Это связано в первую очередь с низкой переносной скоростью протонов в возмущенной области за фронтом околоземной ударной волны. Абсолютная концентрация протонов также несколько меньше, чем в невозмущенном СВ, что дополнительно снижает частоту. При этом на панели (в) видно значительное увеличение (с -2.7 до -6.7) спектра протонов после частоты, теоретически вычисленной по формуле (1). Для альфа-частиц спектр мощности флуктуаций представлен на рис. 4г и демонстрирует явное увеличение показателя спектра на частоте примерно 0.1 Гц. На панели (д) также виден излом на частоте ~ 0.1 Гц.

На рис. 5 показаны параметры и спектры флуктуаций концентрации ионов в невозмущенном солнечном ветре перед фронтом ОЗУВ. Спектр флуктуаций концентрации протонов (см. панель (в)) визуально изменяет наклон около верхней границы спектра, однако теоретическая оценка значения точки перегиба выходит за рамки измерения, в связи с этим предполагается влияние магнитного поля (частоты, соответствующей гирорадиусу). Спектр флуктуаций концентрации альфа-частиц имеет явный излом на частоте 0.08 Гц и второй, не такой заметный, в районе 0.4–0.5 Гц (см. панель (г)).

По этой методике были обработаны 20 пересячений МУВ и 65 – ОЗУВ. По полученным данным были построены гистограммы распределения подсчитанных параметров: частот изломов

спектров флуктуаций концентрации протонов и альфа-частиц перед и за фронтом межпланетной и околоземной ударной волны.

Статистика частоты излома спектров мощности флуктуаций для ОЗУВ и МУВ

На рис. 6 представлены гистограммы распределения частоты излома спектров флуктуаций концентрации ионов до и после прохождения фронта ОЗУВ, рассчитанные по формуле, описанной во введении. На панели (а) приведена статистика частоты излома спектров флуктуаций концентрации протонов в невозмущенном СВ. Максимальное значение частоты излома составило около 2.4 Гц, минимальное – 0.4 Гц. Средняя величина оказалась 1.0 Гц, что выше разрешительной способности прибора. В связи с этим для большинства событий, к сожалению, мы можем дать теоретическую оценку частоты излома, так как «видимая» часть спектра не будет иметь излома. Всего было зарегистрировано пять случаев с частотой, несколько меньшей 0.67, чтобы иметь приемлемую достоверность. Данное количество не является достаточным для хорошего статистического анализа, однако оставляет возможность рассмотрения отдельных событий.

На панели (б) представлена аналогичная статистика для возмущенной области за фронтом ОЗУВ. Мы видим, что все статистические величины оказались меньше, чем в невозмущенном СВ. Особенно заметно понижение средней частоты излома спектра флуктуаций концентрации протонов – 0.6 Гц, что даже меньше частоты

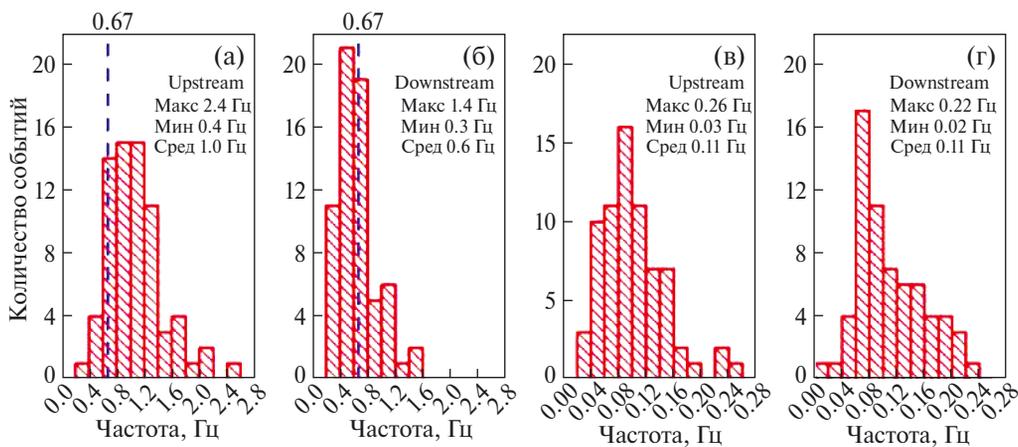


Рис. 6. Гистограммы частоты излома для протонов (панели (а), (б)) и альфа-частиц (панели (в), (г)). Панели (а) и (в) относятся к невозмущенной области, панели (б) и (г) – к области за фронтом ОЗУВ. На панелях представлены максимальные, средние и минимальные значения параметра.

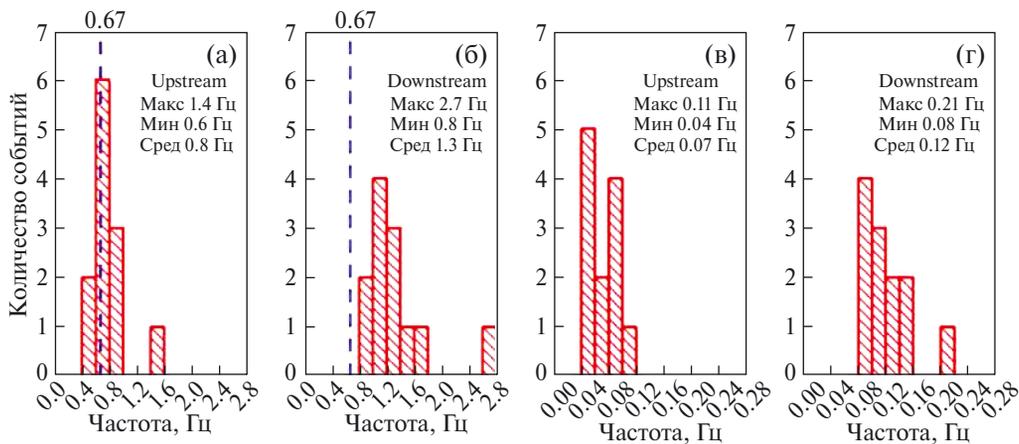


Рис. 7. Гистограммы частоты излома для протонов (панели (а), (б)) и альфа-частиц (панели (в), (г)). Панели (а) и (в) относятся к невозмущенной области, панели (б) и (г) – к области за фронтом МУВ. На панелях представлены максимальные, средние и минимальные значения параметра.

«отсечки» и дает нам больше свободы для исследования в возмущенной области. Однако это не отменяет малого количества полностью подходящих случаев ввиду невозможности сравнить с параметрами в солнечном ветре из-за описанных выше причин.

Для альфа-частиц картина совершенно отличается (панели (в) и (г)). Из-за меньшей концентрации (от 5 до 20%) и несколько меньшей скорости для спектров мощности флуктуаций этого сорта ионов частота отсечки составляет гораздо меньшую величину (в невозмущенном СВ – на порядок), чем для протонов, что значительно ниже предельной разрешительной частоты прибора. Это дает возможность работать со всеми зарегистрированными событиями, которых оказалось 65. Такое количество будет приемлемо для дальнейшего статистического исследования.

На рис. 7 представлены гистограммы распределения частоты излома спектров флуктуации концентрации ионов до и после прохождения фронта МУВ. К сожалению, здесь возникает та же проблема при изучении спектров флуктуации концентрации протонов: в невозмущенном СВ многие события обработать невозможно из-за высокой частоты отсечки. Среднее значение составило 0.8 Гц, а минимальное – 0.6 Гц, что лишь немногим меньше частоты отсечки. За фронтом же МУВ не было найдено ни одного подходящего для рассмотрения события: скорость и концентрация становятся только больше, что делает невозможным наблюдение на спектре излома – минимальное значение частоты излома составило 0.8 Гц.

Для альфа-частиц ситуация обстоит гораздо лучше, как и в случае с событиями, связанными с пересечением ОЗУВ. Среднее значение частоты излома в невозмущенном солнечном ветре составило 0.07 Гц, за фронтом МУВ – 0.12 Гц. Максимальное значение – 0.11 и 0.21 Гц соответственно. Эти значения находятся ниже частоты отсечки, что позволяет работать со спектрами альфа-частиц и в случае пересечения МУВ. Однако стоит отметить, что для этого набора событий статистика будет меньше, но по причине высокой температуры, как было отмечено выше, спектры ионов сливаются за фронтом МУВ ввиду высокого нагрева, и их тяжело различить. Также бывают события со слишком большой скоростью частиц, что приводит к смещению спектра альфа-частиц за пределы измеряемого энергетического диапазона. Это уменьшает количество МУВ, пригодных для обработки.

На рис. 8 представлена сводная гистограмма распределения наклона спектра до излома (МГД-масштаб) для трех параметров плазмы солнечного ветра: полного потока ионов, абсолютной концентрации протонов и альфа-частиц. Для полного потока распределение показывает явный максимум вблизи колмогоровского наклона ($-5/3$). Однако для концентрации ионов по отдельности ситуация значительно отличается. Распределение оказывается гораздо шире, без ярко выраженного максимума, особенно для протонов, что стало достаточно неожиданным результатом.

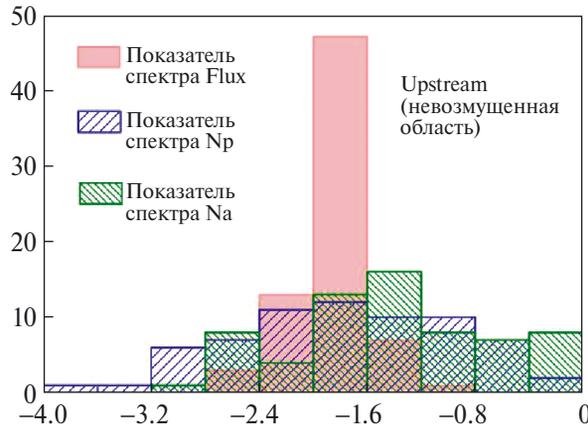


Рис. 8. Показатель степени спектра мощности флуктуаций параметров плазмы до излома для невозмущенной области. Представлены полный поток плазмы, концентрации протонов и альфа-частиц.

ОБСУЖДЕНИЯ И ВЫВОДЫ

По данным измерений прибора БМСВ на КА «Спектр-Р» были определены частоты излома спектров мощности флуктуаций полного потока плазмы, концентрации протонов и альфа-частиц в солнечном ветре, за рампом околоземной ударной волны, за рампом межпланетной ударной волны. Для альфа-частиц подобные данные были получены впервые.

Для возмущенного СВ за рампом МУВ частота излома спектра мощности флуктуаций концентрации протонов оказалась заметно выше (в среднем 1.3 Гц), чем в невозмущенной области (0.8–1.0 Гц), что объясняется увеличением как скорости, так и концентрации протонов — из формулы (1) видно, что частота прямо пропорциональна скорости и концентрации в степени 1/2. Для альфа-частиц также характерно увеличение частоты излома при пересечении фронта МУВ, однако ввиду низкой относительной концентрации и несколько меньшей скорости этот параметр находится в диапазоне наших измерений и может быть изучен в дальнейшем.

В случае пересечения ОЗУВ показано, что среднее значение частоты излома для спектров мощности флуктуаций концентрации протонов за рампом меньше (0.6 Гц), чем в СВ (1.0 Гц). Это происходит ввиду значительного уменьшения скорости и несмотря на повышение концентрации, так как зависимость от концентрации по формуле (1) идет в степени 1/2, а от скорости — в степени 1. Для альфа-частиц изменение частоты излома спектра может быть едва заметно из-за локального увеличения концентрации

за фронтом околоземной ударной волны (0.11 Гц для возмущенной области и 0.11 Гц для СВ). При этом вопрос о двойном изломе для спектров флуктуаций остается открытым. Есть предположение, что спектр мощности относительной концентрации альфа-частиц может отображать обе частоты излома (и по протонам, и по альфа-частицам). Например, на рис. 5д есть визуальные указания на еще один излом в районе 0.4–0.5 Гц, что может быть связано с влиянием как протонов, так и магнитного поля (частота излома, соответствующая гирорадиусу), однако уточнить этот вопрос пока не представляется возможным.

На этом же рисунке спектр альфа-частиц демонстрирует «плато» на низких частотах, похожее на описанное в работе [24]. Это плато прослеживается на спектре флуктуаций относительной концентрации альфа-частиц (см. панель (д)). Этот же спектр имеет явный излом на второй частоте, что подтверждает предположение о влиянии еще одного механизма передачи энергии.

Распределение, полученное на рис. 8, нуждается в дальнейшем анализе. В случае погрешностей обработки было бы ожидаемо увидеть такое уширение скорее для альфа-частиц по причинам затрудненности вычисления их параметров. Точные причины такого различия (между потоком и сортами ионов) пока не ясны, основные версии следующие: зависимость от скорости потока плазмы, недостаточная длительность периода, по которому строился спектр, погрешность вычисления наклона спектра также пока не исключается из возможных причин. Данный вопрос находится в процессе изучения.

Дальнейшее изучение характеристик спектров мощности флуктуаций будет сосредоточено на альфа-частицах, так как их частота излома существенно ниже частоты отсечки (максимально разрешаемая прибором частота) как для случаев пересечения МУВ, так и ОЗУВ. Рассмотрение распределения наклона спектров флуктуаций концентрации протонов и альфа-частиц, имеющих различную массу и заряд, дает дополнительную информацию по физике процессов вблизи фронта бесстолкновительных ударных волн в космической плазме.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-12-00227.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Matthaeus W.H., Weygand J.M., Dasso S.* Ensemble space-time correlation of plasma turbulence in the solar wind // *Physical Review Letters*. 2016. V. 116. Iss. 24. Art. ID. 245101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.245101>
2. *Bruno R., Carbone V.* The solar wind as a turbulence laboratory // *Living Reviews in Solar Physics*. 2013. V. 10. Art. ID. 2. <https://doi.org/10.12942/lrsp-2013-2>
3. *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 Mechanics*. 1962. V. 13. Iss. 1. P. 82–85. <https://doi.org/10.1017/S0022112062000518>
4. *Unti T.W.J., Neugebauer M., Goldstein B.E.* Direct measurements of solar-wind fluctuations between 0.0048 and 13.3 Hz // *Astrophysical J.* 1973. V. 180. P. 591–598. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1973ApJ...180..591U/. <https://doi.org/10.1086/151987>
5. *Celnikier L.M., Harvey C.C., Jegou R. et al.* A determination of the electron density fluctuation spectrum in the solar wind, using the ISEE propagation experiment // *Astronomy and Astrophysics*. 1983. V. 126. Iss. 2. P. 293–298. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1983A&A...126..293C>
6. *Zastenker G.N., Safrankova J., Nemecek Z. et al.* Fast measurements of parameters of the Solar Wind using the BMSW instrument // *Cosmic Res.* 2013. V. 51. P. 78–89. <https://doi.org/10.1134/S0010952513020081>
7. *Safrankova J., Nemecek Z., Prech L. et al.* Fast solar wind monitor (BMSW): Description and first results // *Space Science Reviews*. 2013. V. 175. Iss. 1–4. P. 165–182. <http://dx.doi.org/10.1007/s11214-013-9979-4>
8. *Safrankova J., Nemecek Z., Nemecek F. et al.* Solar wind density spectra around the ion spectral break // *Astrophysical J.* 2015. V. 803. Iss. 2. Art. ID. 107. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/803/2/107>
9. *Safrankova J., Nemecek Z., Nemecek F. et al.* Power spectral density of fluctuations of bulk and thermal speeds in the solar wind // *Astrophysical J.* 2016. V. 825. Iss. 2. Art. ID. 121. <https://doi.org/10.3847/0004-637X/825/2/121>
10. *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. <http://dx.doi.org/10.5194/angeo-34-1011-2016>
11. *Riazantseva M.O., Budaev V.P., Rakhmanova L.S. et al.* Comparison of properties of small scale ion flux fluctuations in flank magnetosheath and in solar wind // *Advances in Space Research*. 2016. V. 58. Iss. 2. P. 166–174. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2015.12.022>
12. *Rakhmanova L.S., Riazantseva M.O., Zastenker G.N. et al.* Large-Scale Solar Wind Phenomena Affecting the Turbulent Cascade Evolution behind the Quasi-Perpendicular Bow Shock // *Universe*. 2022. V. 8. Iss. 12. Art. ID. 611. <https://doi.org/10.3390/universe8120611>
13. *Rakhmanova L., Riazantseva M., Zastenker G. et al.* Role of the variable solar wind in the dynamics of small-scale magnetosheath structures // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2023. V. 10. <https://doi.org/10.3389/fspas.2023.1121230>
14. *Ogilvie K.W., Wilkerson T.D.* Helium abundance in the solar wind // *Solar Physics*. 1969. V. 8. Iss. 2. P. 435–449. <https://doi.org/10.1007/BF00155391>
15. *Formisano V., Palmiotto F., Moreno G.* α -particle observations in the solar wind // *Solar Physics*. 1970. V. 15. Iss. 2. P. 479–498. <https://doi.org/10.1007/BF00151853>
16. *Borovsky J.E.* Flux-tube texture of the solar wind: Strands of the magnetic carpet at 1 AU? // *J. Geophysical Research*. 2008. V. 113. Iss. A8. Art. ID. 8110. <https://doi.org/10.1029/2007JA012684>
17. *Kasper J.C., Stevens M.L., Korreck K.E. et al.* Evolution of the relationships between helium abundance, minor ion charge state, and solar wind velocity over the solar cycle // *The Astrophysical J.* 2012. V. 745. Iss. 2. Art. ID. 162. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/745/2/162>
18. *Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Yermolaev M.Y. et al.* Dynamics of large-scale solar-wind streams obtained by the double superposed epoch analysis: 4. Helium abundance // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2020. V. 125. Iss. 7. Art. ID. e2020JA027878. <https://doi.org/10.1029/2020JA027878>
19. *Leamon R.J., Matthaeus W.H., Smith C.W. et al.* MHD-driven kinetic dissipation in the solar wind

- and corona // *Astrophysical J.* 2000. V. 537. Iss. 2. P. 1054–1062. <https://doi.org/10.1086/309059>
20. *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. Iss. A9. P. 18625–18634. <https://doi.org/10.1029/2001JA000022>
21. *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. Art. ID. A05103. <https://doi.org/10.48550/arXiv.0707.3147>
22. *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. Iss. 1. P. 310–377. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/182/1/310>
23. *Sapunova O.V., Borodkova N.L., Zastenker G.N. et al.* Dynamics of He⁺⁺ Ions at Interplanetary and Earth's Bow Shocks // *Universe.* 2022. V. 8. Iss. 10. Art. ID. 516. <https://doi.org/10.3390/universe8100516>
24. *Рахманова Л. С., Рязанцева М. О., Застенкер Г. Н. и др.* Влияние магнитопаузы и головной ударной волны на характеристики турбулентности плазмы в магнитослое Земли // *Геомагнетизм и аэронавигация.* 2018. Т. 58. № 6. С. 749–758. <https://doi.org/10.1134/S0016794018060135>.