

**ФЛУКТУАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И МГД-ВОЛНЫ
В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ****COSMIC RAY FLUCTUATIONS AND MHD WAVES
IN THE SOLAR WIND****С.А. Стародубцев** *Институт космофизических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, starodub@ikfia.ysn.ru***А.С. Зверев** *Институт космофизических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, ZverevAS@ikfia.ysn.ru***П.Ю. Гололобов** *Институт космофизических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, gpeter@ikfia.ysn.ru***В.Г. Григорьев** *Институт космофизических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, grig@ikfia.ysn.ru***S.A. Starodubtsev***Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy
SB RAS,
Yakutsk, Russia, starodub@ikfia.ysn.ru***A.S. Zverev***Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy
SB RAS,
Yakutsk, Russia, ZverevAS@ikfia.ysn.ru***P.Yu. Gololobov***Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy
SB RAS,
Yakutsk, Russia, gpeter@ikfia.ysn.ru***V.G. Grigoryev***Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy
SB RAS,
Yakutsk, Russia, grig@ikfia.ysn.ru*

Аннотация. Во время крупномасштабных возмущений солнечного ветра часто наблюдаются вариации галактических космических лучей с периодами от нескольких минут до 2–3 ч, которые в научной литературе называются «флуктуации космических лучей» и которые в отсутствие возмущений не наблюдаются. Поскольку космические лучи являются заряженными частицами, то их модуляция в гелиосфере происходит под воздействием главным образом межпланетного магнитного поля, точнее его турбулентной части — МГД-волн. Для корректного описания связи их спектров флуктуаций нужно уметь выделять из данных прямых измерений параметров межпланетной среды определенный тип МГД-волн. В данной работе мы рассматриваем некоторые методы для определения вклада в наблюдаемые спектры мощности флуктуаций модуля межпланетного магнитного поля трех ветвей МГД-турбулентности солнечного ветра, а именно альфвеновской, быстрой и медленной магнитозвуковых волн, соответствующих частотам инерционного участка спектра турбулентности $10^{-4} < \nu < 10^{-1}$ Гц, на которых наблюдаются флуктуации КЛ. Для этого мы применяем методы спектрального и поляризационного анализа. При отсутствии данных измерений параметров СВ для идентификации типа МГД-турбулентности мы используем известные свойства поляризации волн, а именно то, что альфвеновские и магнитозвуковые волны имеют различные плоскости поляризации относительно плоскости, содержащей средний вектор ММП \vec{B}_0 и волновой вектор \vec{k} .

Полученные нами результаты показывают, что при корректном определении спектров трех типов МГД-волн их сумма в пределах ошибок хорошо совпадает с наблюдаемыми спектрами модуля ММП, а небольшая разница может быть отнесена на счет замороженных в плазму статических неоднородностей

Abstract. During large-scale solar wind disturbances, variations in galactic cosmic rays with periods from several minutes to 2–3 hours, which are called cosmic ray fluctuations in the scientific literature, often occur. Such fluctuations are not observed in the absence of disturbances. Since cosmic rays are charged particles, their modulation in the heliosphere occurs mainly under the influence of the interplanetary magnetic field, or rather its turbulent part — MHD waves. In order to adequately describe the relationship between their fluctuation spectra, it is necessary to be able to isolate a certain type of MHD waves from direct measurements of the interplanetary medium parameters. In this paper, we consider some methods for determining the contribution of three solar wind MHD turbulence branches, namely, Alfvén, fast, and slow magnetosonic waves corresponding to the turbulence spectrum inertial region frequencies $10^{-4} < \nu < 10^{-1}$ Hz, at which cosmic ray fluctuations are observed, to the observed power spectra of interplanetary magnetic field modulus fluctuations. To do this, we apply the methods of spectral and polarization analysis. In the absence of measurement data on SW parameters, to identify the type of MHD turbulence we use the known wave polarization properties that Alfvén and magnetosonic waves are polarized in different planes relative to the plane containing the average IMF vector \vec{B}_0 and wave vector \vec{k} .

Our results show that with the correct determination of the spectra of three MHD wave types, their sum, within the limits of errors, agrees well with the observed spectra of the interplanetary magnetic field modulus, and a small difference can be attributed to static inhomogeneities and oscillations frozen into plasma, as well as to various discontinuities that are always inevitably present in the solar wind.

Keywords: cosmic rays, interplanetary magnetic field, solar wind, MHD waves.

и колебаний, а также различных разрывов, которые всегда присутствуют в солнечном ветре.

Ключевые слова: космические лучи, межпланетное магнитное поле, солнечный ветер, МГД-волны.

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что галактические космические лучи (КЛ) при распространении в гелиосфере подвержены модуляции в бесстолкновительной плазме солнечного ветра (СВ). В результате этого при крупномасштабных возмущениях СВ часто наблюдаются вариации КЛ с периодами от нескольких минут до 2–3 ч, которые называются флуктуациями КЛ. При этом флуктуации межпланетного магнитного поля (ММП) определяют условия распространения КЛ в гелиосфере и, следовательно, определяют механизм модуляции их функции распределения. В настоящее время в научной литературе на этот счет существуют две различные точки зрения. Первая состоит в том, что флуктуации КЛ возникают при взаимодействии потока частиц с альфвеновскими волнами. При этом модуляции подвергается малая (менее 1 %), анизотропная составляющая функции распределения КЛ [Owens, 1974]. Согласно второй, модуляции подвергается значительно большая по величине (около 99 %) изотропная составляющая, которая обусловлена взаимодействием КЛ с быстрыми магнитозвуковыми волнами [Бережко, Стародубцев, 1988]. Заметим, что теория корректно описывает наблюдаемую связь между спектрами флуктуаций КЛ и ММП [Бережко, Стародубцев, 1988; Гранский, Стародубцев, 1991; Стародубцев и др., 1996], что свидетельствует в пользу второй точки зрения. При этом задача идентификации наблюдаемых в эксперименте флуктуаций ММП с известными типами МГД-волн до сих пор решена не до конца. Трудности идентификации возникают, во-первых, вследствие того, что флуктуации ММП и плазмы СВ, как правило, являются совокупностью волн различных частот и типов и, во-вторых, из-за неполного набора измеряемых параметров поля и плазмы или недостаточно высокого качества измерений. Линейная теория МГД-волн в плазме устанавливает их основные свойства, согласно которым высокая степень корреляции (или когерентности) между величиной ММП B и скоростью СВ U свидетельствует о наличии в наблюдаемых спектрах турбулентности СВ альфвеновских волн, между B и плотностью СВ n — быстрых, а между U и n — медленных магнитозвуковых волн [Neugebauer et al., 1978; Топтыгин, 1983].

Ниже мы рассматриваем некоторые методы анализа данных прямых измерений параметров межпланетной среды на космических аппаратах для определения типа и вклада в наблюдаемые спектры мощности флуктуаций модуля ММП трех ветвей МГД-турбулентности СВ: альфвеновских, быстрых и медленных магнитозвуковых волн. Для их идентификации мы применяем методы спектрального и поляризационного анализа. В последнем случае для идентификации типа МГД-турбулентности мы

используем известные свойства поляризации волн, а именно то, что альфвеновские и магнитозвуковые волны имеют различные плоскости поляризации относительно плоскости, содержащей средний вектор ММП \vec{B}_0 и волновой вектор \vec{k} [Куликовский, Любимов, 1962].

Анализ наземных измерений флуктуаций интенсивности КЛ и прямых измерений параметров ММП и СВ для идентификации определенного типа МГД-турбулентности является целью этой статьи.

1. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В нашей работе мы используем исправленные на давление одномоментные данные измерений нейтронных мониторов станций КЛ Якутск и Тикси [<https://ysn.ru/ipm>], а также одномоментные данные прямых измерений модуля и компонент ММП в GSE-системе координат и скорости и плотности СВ приборами, установленными на космическом аппарате WIND [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/sc_merge_min1.html]. Нужно отметить, что на этом сайте представлены данные уже приведенные к носу отошедшей околоземной ударной волны.

Для оценок спектральной мощности флуктуаций интенсивности КЛ, ММП и СВ, соответствующих инерционному участку спектра турбулентности в области частот $10^{-4} < \nu < 10^{-2}$ Гц, мы применяем стандартный метод Блэкмена—Тьюки с корреляционным окном Тьюки [Дженкинс, Ваттс, 1971; Отнес, Эноксон, 1982]. Длина реализации составляла 1 сут, т. е. 1440 отчетов одномоментных измерений. Предварительно с целью приведения исходных данных к квазистационарному виду, а также с целью исключения из них низкочастотных трендов и возможного искажения полученных оценок мощности вся исходная информация подвергалась стандартной процедуре приведения к нулевому среднему и полосовой фильтрации в указанной выше области частот. При построении доверительных интервалов оценки мощности флуктуаций различных величин мы учитывали, что число степеней свободы с использованием корреляционного окна Тьюки $DoF = 2.667 \cdot L$, где L — коэффициент обрезания ковариационной функции [Дженкинс, Ваттс, 1971].

Ниже мы приводим основные общие формулы и соотношения для спектрального описания случайных процессов, которые мы использовали в анализе данных измерений.

В случае если имеется только одна некоторая случайная величина x , ее односторонняя плотность спектра мощности [Дженкинс, Ваттс, 1971; Отнес, Эноксон, 1982] определяется как

$$P_{xx}(\nu) = 2 \int_0^m w(\tau) R_{xx}(\tau) \cos(2\pi\nu\tau) d\tau, \quad (1)$$

здесь $R_{xx}(\tau)$ — автоковариационная функция; $w_\tau(\tau) = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi\tau}{m} \right)$, $\tau \leq m$, где $w_\tau(\tau) = 0$, $\tau > m$ — выбранное нами корреляционное окно Тьюки. Стандартный набор частот определяется как $\nu_i = \frac{i}{2m\Delta t}$, $i=0, 1, \dots, m$, где i — номер соответствующей гармоники, Δt — шаг дискретизации данных.

При наличии двух реализаций случайных величин X и Y появляется возможность вычисления плотности их кросс-спектра. Его значения можно записать через сумму действительной и мнимой частей спектра мощности $P_{xy}(\nu) = C_{xy}(\nu) + jQ_{xy}(\nu)$. Тогда абсолютное значение плотности кросс-спектра запишется в виде

$$|P_{xy}(\nu)| = \sqrt{C_{xy}^2(\nu) + Q_{xy}^2(\nu)}, \quad (2)$$

где односторонняя коспектральная плотность спектра мощности

$$C_{xy}(\nu) = 2 \int_0^m w(\tau) R_{xy}(\tau) \cos(2\pi\nu\tau) d\tau, \quad (3)$$

а односторонняя квадратурная спектральная плотность спектра мощности

$$Q_{xy}(\nu) = 2 \int_0^m w(\tau) R_{xy}(\tau) \sin(2\pi\nu\tau) d\tau. \quad (4)$$

Коэффициент когерентности $\Gamma_{xy}(\nu)$ определяется как положительное значение квадратного корня из функции когерентности $\Gamma_{xy}^2(\nu) = |P_{xy}^2(\nu)| / (P_{xx}(\nu)P_{yy}(\nu))$:

$$\Gamma_{xy}(\nu) = +\sqrt{\Gamma_{xy}^2(\nu)}. \quad (5)$$

Коэффициент когерентности Γ представляет собой обобщение корреляционной функции на частотную область и, по определению, принимает значения $0 \leq \Gamma \leq 1$. Если предварительная фильтрация данных не проводилась, то $\Gamma_{xy}(\nu) \equiv 1$ [Канасевич, 1985]. Нужно заметить, что при анализе данных коэффициент когерентности играет важную роль. Он используется как для оценки доли каждого типа МГД-волн в общем наблюдаемом спектре флуктуаций модуля ММП [Luttrell, Richter, 1987; Бережко, Стародубцев, 1988], так и для правильного определения плоскости поляризации этих волн [Транский, Стародубцев, 1991].

В случае если данные измерений параметров плазмы СВ отсутствуют, а есть только измерения компонент ММП, мы используем метод определения поляризационных параметров МГД-волн через спектральные матрицы, который описан в работах [Канасевич, 1985; Транский, Стародубцев, 1991]. Для альфвеновских волн плоскость колебаний вектора напряженности магнитного поля \vec{B} перпендикулярна плоскости, содержащей регулярное поле \vec{B}_0 и волновой вектор \vec{k} , а для магнитозвуковых волн эти плоскости параллельны [Куликовский, Любимов, 1962]. Необходимо произвести поворот спектральной матрицы, чтобы перейти из исходной

системы координат GSE в новую систему отсчета GSE', оси которой мы далее обозначаем буквами со штрихом. Только тогда мы можем правильно определить параметры поляризации МГД-волн и сделать заключение о преобладании определенного их типа в наблюдаемом спектре мощности модуля ММП.

На рис. 1 для общего случая наличия гармонического сигнала показан эллипс поляризации в исходной системе координат XOY и в новой системе координат X'OY', совмещенной с его главными осями (начало координат — точка O — на рис. 1 не показана). Через спектральные матрицы для компонент вектора ММП в новой системе координат X'OY' параметры поляризации можно записать следующим образом.

Степень поляризации:

$$R(\nu) = \sqrt{1 - \frac{4|P_{xy}(\nu)|}{P_{xx}(\nu) + P_{yy}(\nu)}}, \quad 0 \leq R(\nu) \leq 1. \quad (6)$$

Здесь и ниже в формулах индексы x и y означают выбранные для анализа две ортогональные компоненты ММП из трех после перехода в систему координат GSE'. Заметим, что в поляризационном анализе важную роль играет коэффициент когерентности, поскольку между компонентами ММП X и Y должно выполняться равенство $R(\nu) = \Gamma(\nu)$, если эта плоскость является плоскостью поляризации. Однако на практике из-за неизбежного присутствия шума в данных и смеси различных волн и колебаний выполняется их приближенное равенство.

Эллиптичность: $\varepsilon(\nu) = \tan \chi(\nu)$,

$$\sin 2\chi(\nu) = \frac{2Q_{xy}(\nu)}{\sqrt{(C_{xx}(\nu) + C_{yy}(\nu))^2 - 4|P_{xy}(\nu)|}}. \quad (7)$$

Если $0 \leq \chi(\nu) \leq \pi/4$, то волна, соответствующая частоте ν , является правополяризованной (вращение происходит по часовой стрелке), если же $-\pi/4 \leq \chi(\nu) < 0$, то волна левополяризованная (вращение против часовой стрелки).

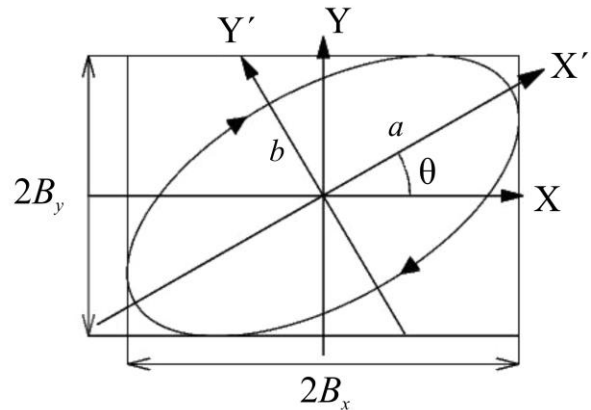


Рис. 1. Эллипс поляризации в исходной системе координат XOY и в системе координат X'OY', совмещенной с его главными осями. X, Y и X', Y' — оси исходной и новой систем координат; a и b — большая и малая полуоси эллипса; θ — угол поляризации; B_x и B_y — компоненты ММП. Стрелками на эллипсе показано направление поляризации

Угол поляризации, который образован большой полуосью эллипса и осью X:

$$\tan 2\theta(v) = \frac{2C_{xy}(v)}{P_{xx}(v) - P_{yy}(v)}. \quad (8)$$

Важно, что применение техники направляющих косинусов позволяет с помощью спектральных оценок определить направления распространения волн в исходной системе координат в зависимости от частоты ν для всех трех компонент волнового вектора \vec{k} :

$$\begin{aligned} K_x(v) &= \frac{Q_{yz}(v)}{\sqrt{Q_{xy}^2(v) + Q_{xz}^2(v) + Q_{yz}^2(v)}}, \\ K_y(v) &= \frac{Q_{xz}(v)}{\sqrt{Q_{xy}^2(v) + Q_{xz}^2(v) + Q_{yz}^2(v)}}, \\ K_z(v) &= \frac{Q_{xy}(v)}{\sqrt{Q_{xy}^2(v) + Q_{xz}^2(v) + Q_{yz}^2(v)}}. \end{aligned} \quad (9)$$

При этом всегда должно выполняться условие $K(v) = \sqrt{K_x^2(v) + K_y^2(v) + K_z^2(v)} \equiv 1$, что является также проверкой правильности определения направления распространения МГД-волн. Такой подход к определению волнового вектора \vec{k} оправдан тем, что длина реализации достаточно большая, а скорость движения космических аппаратов на порядок величины меньше скорости распространения МГД-волн, поэтому их можно считать неподвижными относительно СВ. Заметим, что в бесстолкновительной плазме СВ всегда существуют замороженные в нее и переносимые вместе с ней разного рода статические колебания и разрывы, которые на временных графиках невозможно отличить от волн (поэтому их часто путают), но они, в отличие от последних, не имеют какого-либо выделенного направления распространения. Нужно отметить также, что используемый нами подход применим к плоским волнам.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Мы представляем результаты анализа флуктуаций КЛ и МГД-волн в СВ для двух разных событий. Первое событие охватывает период времени с 10:04 UT 12 марта 2022 г. до 10:04 UT 13 марта 2022 г., а второе — 00:00–23:59 UT 18 октября 2009 г. Эти два периода времени характеризуются совершенно различной электромагнитной и радиационной обстановкой на орбите Земли (рис. 2).

В первом случае в 10:05 UT 13 марта 2022 г. космическим аппаратом WIND была зарегистрирована квазипараллельная межпланетная ударная волна (МУВ) с углом между средним направлением ММП \vec{B}_0 и нормалью \vec{n} к фронту $\theta_{Bn} = 43.2^\circ$ и компонентами нормали в GSE-системе координат $n_x = -0.586$; $n_y = 0.648$; $n_z = -0.01$ [<https://lweb.cfa.harvard.edu/shocks>] (см. рис. 2, а–в). Она сопровождалась зарегистрированными на КА ACE потоками ускоренных частиц [<https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/index.html>], которые могли в окрестности префронта сгенерировать быстрые магнитозвуковые волны (БМЗВ) [Бережко,

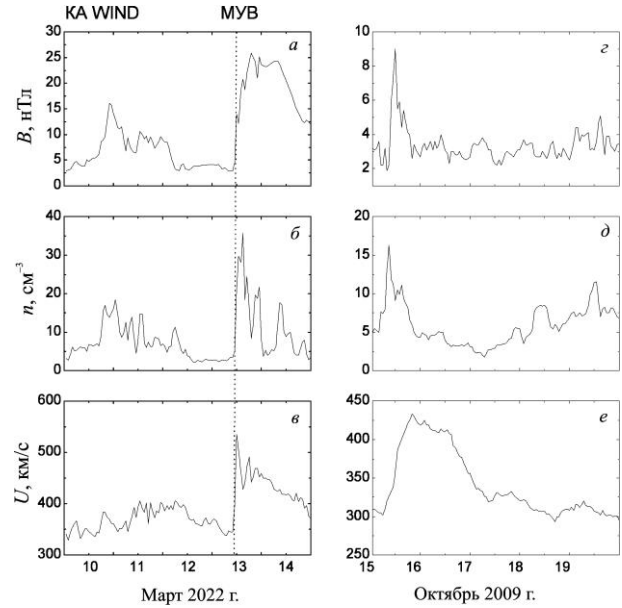


Рис. 2. Зависимость от времени модуля ММП (а, з), плотности (б, д) и скорости (в, е) СВ по измерениям на космическом аппарате WIND для рассматриваемых событий в марте 2022 г. и октябре 2009 г. соответственно. Вертикальным пунктиром отмечено время регистрации МУВ

Стародубцев, 1988]. Второму событию (18 октября 2009 г.) соответствует спокойный период времени: оно имело место на четвертые сутки после прихода 15 октября к Земле слабого потока СВ, характеризующегося небольшой, ниже 440 км/с, максимальной скоростью (см. рис. 2, з–е).

Рассмотрим более подробно событие 12–13 марта 2022 г.

На рис. 3, а приведен коэффициент когерентности флуктуаций КЛ, определенный по измерениям на нейтронных мониторах ст. Тикси и Якутск. Видно, что на частоте $\nu = 2.41 \cdot 10^{-3}$ Гц присутствует выраженный пик. На основании ранее установленной природы флуктуаций КЛ [Бережко, Стародубцев, 1988; Гранский, Стародубцев, 1991; Стародубцев и др., 1996] можно предположить, что в это время в СВ присутствовали БМЗВ. Для проверки этого предположения перейдем к определению свойств этих волн посредством анализа прямых измерений параметров ММП и СВ.

На рис. 3, б приведены спектры мощности флуктуаций модуля и компонент ММП. Видно, что в области частот $\nu > 10^{-3}$ Гц мощности компонент и модуля ММП примерно равны. Это означает, что в наблюдаемые спектры вносит вклад не только направление, но и величина ММП, что свойственно магнитозвуковым волнам [Коваленко, 1983]. Анализ данных измерений ММП, параметров СВ и коэффициента когерентности Γ_{Bn} (рис. 3, в) приводит к выводу, что в этой области частот вклад БМЗВ в наблюдаемый спектр мощности флуктуаций модуля ММП составляет около 30%. Перемножив между собой определенные выше значения спектров мощности модуля ММП $P_{|B|}$ и коэффициента когерентности Γ_{Bn} , мы получим спектр мощности БМЗВ (рис. 3, з).

Как известно, МГД-волны, в отличие от разрывов и статических колебаний, замороженных в плазму

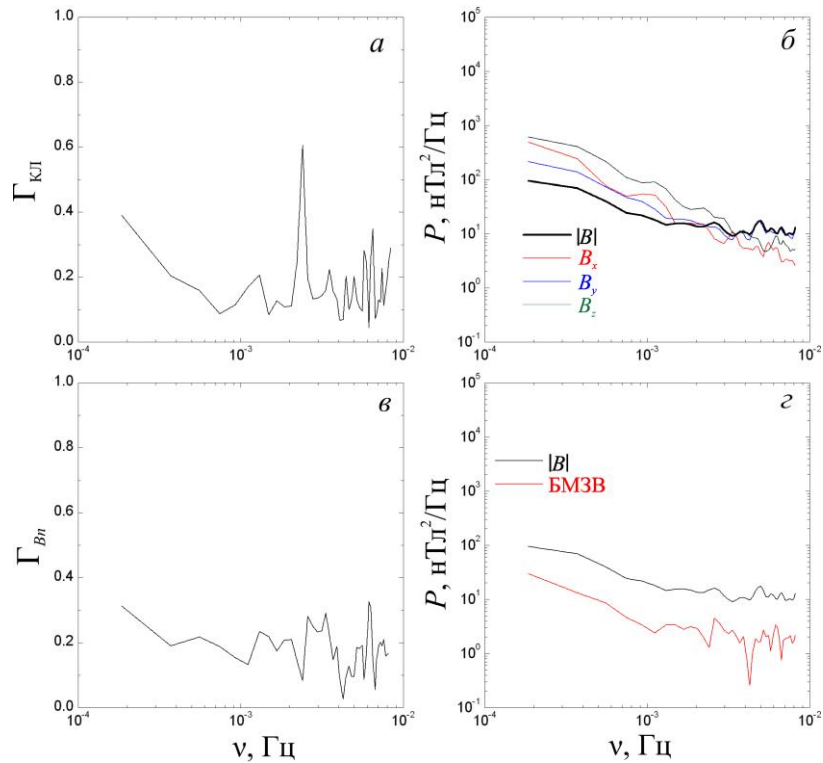


Рис. 3. Коэффициент когерентности флуктуаций КЛ Γ (а); спектры мощности флуктуаций модуля и компонент ММП (б); коэффициент когерентности Γ модуля ММП B и плотности n СВ (в); спектры мощности флуктуаций модуля ММП и быстрых магнитозвуковых волн (з) как функции частоты ν для события 12–13 марта 2022 г.

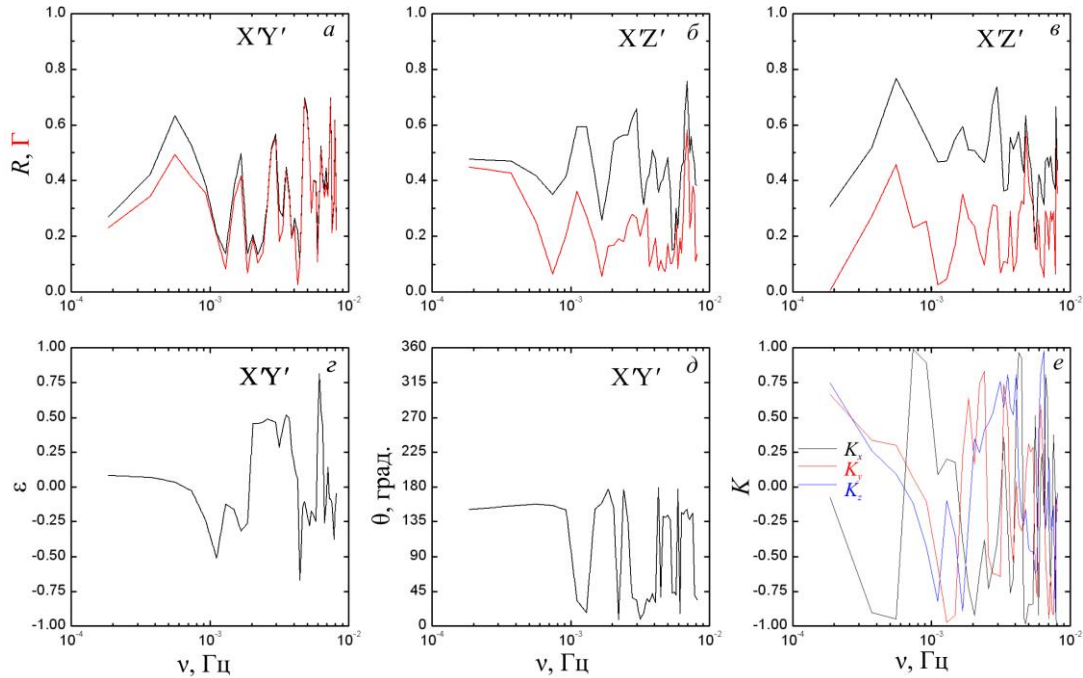


Рис. 4. Параметры поляризации после перехода в новую систему координат для события 12–13 марта 2022 г.: степень поляризации R и коэффициент когерентности Γ компонент ММП B'_x и B'_y (а), B'_y и B'_z (б), B'_y и B'_z (в) в плоскостях $X'Y'$, $X'Z'$ и $Y'Z'$ соответственно; эллиптичность ϵ (г); угол поляризации θ (д) в плоскости $X'Y'$; компоненты вектора направления распространения МГД-волн \vec{k} (е) в зависимости от частоты ν

СВ, являются поляризованными, поэтому определение их характеристик имеет важное значение при определении типа волн.

Для рассматриваемого события на рис. 4, а–д показаны определенные нами параметры поляризации.

С учетом того, что в плоскости поляризации должно выполняться соотношение $R \approx \Gamma$, из рис. 4, а–в следует, что в рассматриваемом случае для волны частотой $\nu = 2.41 \cdot 10^{-3}$ Гц плоскостью поляризации является плоскость $X'Y'$, параллельная плоскости, содер-

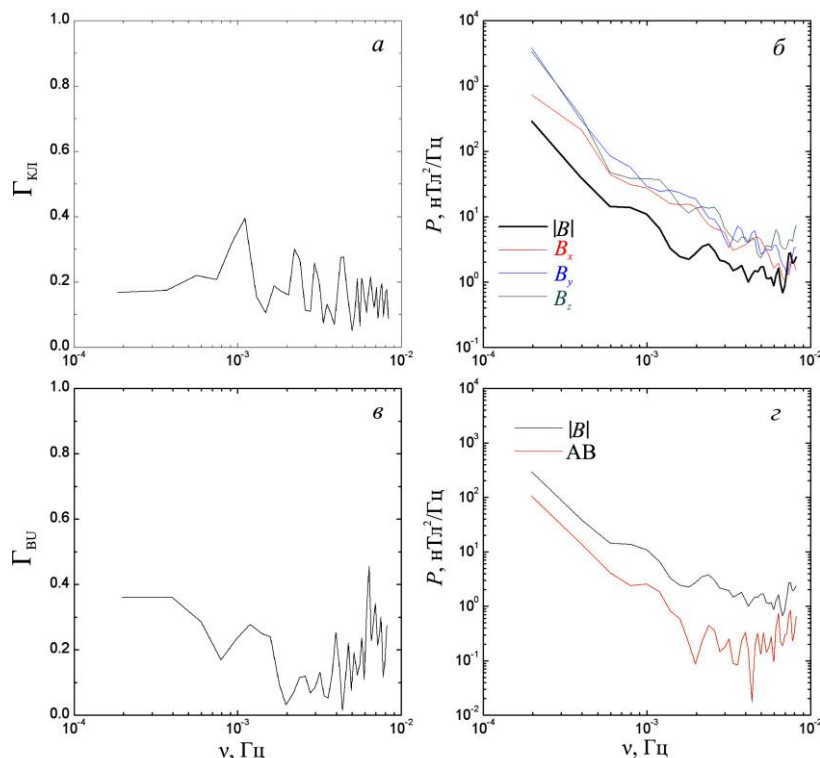


Рис. 5. Коэффициент когерентности флуктуаций КЛ Γ (а); спектры мощности флуктуаций модуля и компонент ММП (б); коэффициент когерентности Γ модуля ММП B и скорости СВ U (в); спектры мощности флуктуаций модуля ММП и альфвеновских волн (г) как функции частоты ν для события 18 октября 2009 г.

жащей регулярное поле \vec{B}_0 и волновой вектор \vec{k} . Заметим, что этой плоскости параллельна также плоскость $X'Z'$, но она не является плоскостью поляризации, поскольку для нее не выполняется условие $R \approx \Gamma$. Это относится и к плоскости $Y'Z'$.

Можно сделать заключение, что именно плоскость $X'Y'$ является плоскостью поляризации, а МГД-волна на частоте $\nu = 2.41 \cdot 10^{-3}$ Гц относится к магнитозвуковому типу. Степень ее поляризации $R \approx 0.56$ (рис. 4, а), эллиптичность $\varepsilon \approx 0.46$ (рис. 4, з), соответствующий ей угол $\chi \approx 24.7^\circ$, т. е. волна правополяризована, а угол поляризации составляет $\theta \approx 176^\circ$ (рис. 4, д). Компоненты волнового вектора \vec{k} на частоте $\nu = 2.41 \cdot 10^{-3}$ Гц в исходной GSE-системе координат $k_x \approx -0.38$, $k_y \approx -0.83$, $k_z \approx -0.41$ (рис. 4, е).

Рассмотрим событие 18 октября 2009 г. На рис. 5 для этого события представлена та же информация, что и на рис. 3 для события 12–13 марта 2022 г. Видно, что коэффициент когерентности флуктуаций КЛ на частоте $\nu \approx 10^{-3}$ Гц имеет небольшой пик $\Gamma_{KL} \approx 0.4$, который можно принять за маркер присутствия в СВ БМЗВ (рис. 5, а). Однако в наблюдаемом спектре флуктуаций компонент и модуля ММП (рис. 5, б) мощность модуля ММП существенно ниже мощности его компонент. Следовательно, в спектр флуктуаций вносят вклад главным образом колебания направления поля, а не величины. Это указывает на присутствие в СВ значительного количества альфвеновских волн (АВ). Значения коэффициента когерентности поля B и скорости СВ U приведены на рис. 5, в. Из него следует, что вклад АВ в наблю-

даемый спектр ММП составляет на разных частотах от единиц до 50 %. Соотношение между наблюдаемым спектром флуктуаций модуля ММП и спектром АВ иллюстрирует рис. 5, г.

Результаты поляризационного анализа подтверждают наше заключение о том, что в данном событии преобладают МГД-волны альфвеновского типа. На рис. 6, а видно, что колебания вектора ММП происходят в плоскости $Y'Z'$, перпендикулярной плоскости, содержащей регулярное поле \vec{B}_0 и волновой вектор \vec{k} , что является признаком наличия АВ. На рис. 6, б–в показаны параметры поляризации: эллиптичность, направление вращения и угол поляризации на каждой частоте, характерной для всего ансамбля АВ, а рис. 6, г дает представление о направлении распространения АВ в СВ.

Многочисленные измерения и анализ свойств МГД-волн показывают, что АВ присутствуют в СВ как минимум в 80 % случаев [Neugebauer et al., 1978; Топтыгин, 1983; Коваленко, 1983]. Известно также, что они, в силу малого декремента затухания, распространяются от места своей генерации в источнике на Солнце или в межпланетном пространстве далеко за орбиту Земли, а также что в случае их регистрации мы не должны ожидать появления значимых флуктуаций интенсивности КЛ.

Полученные нами результаты показывают, что при корректном определении спектров трех типов МГД-волн их сумма в пределах ошибок хорошо совпадает с наблюдаемыми спектрами модуля ММП. Наблюдаемая небольшая разница может быть отне-

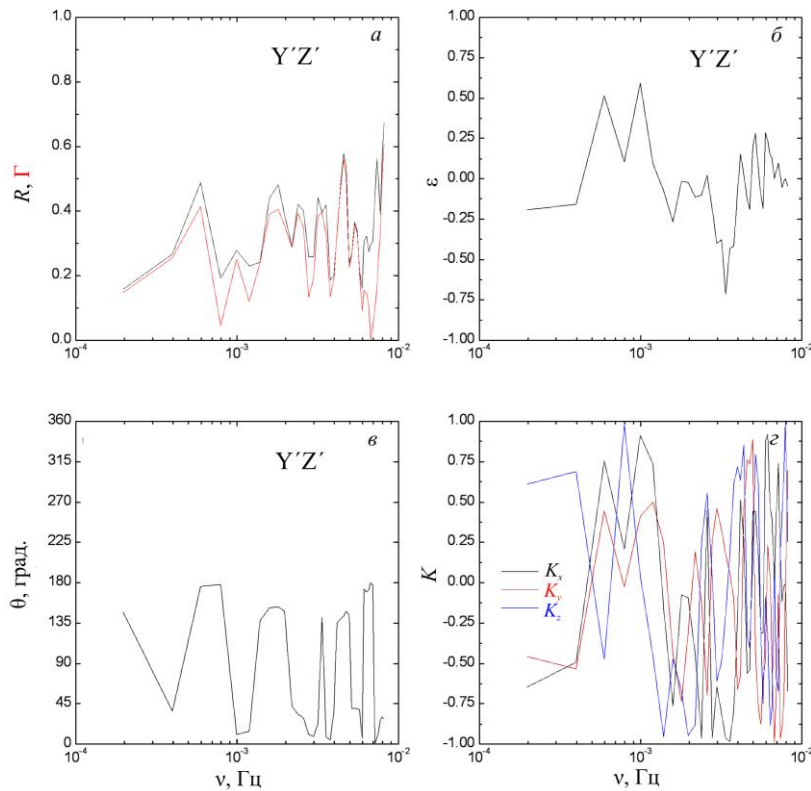


Рис. 6. Параметры поляризации после перехода в новую систему координат для события 18 октября 2009 г.: степень поляризации R и коэффициент когерентности Γ компонент ММП B'_y и B'_z (а); эллиптичность ϵ (б) и угол поляризации θ (в) в плоскости $X'Z'$; компоненты вектора направления распространения МГД-волн \vec{k} (г) в зависимости от частоты ν

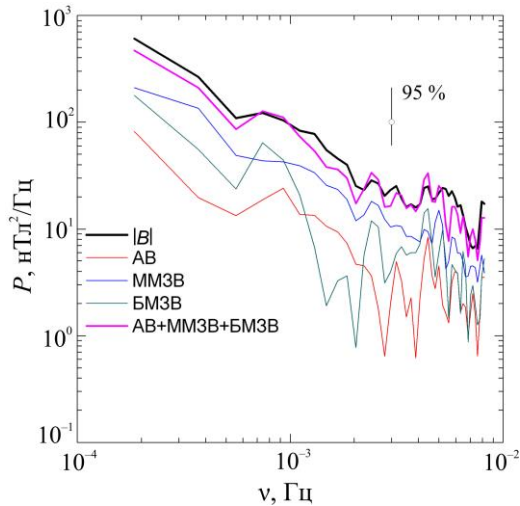


Рис. 7. Наблюдаемый спектр мощности флуктуаций модуля ММП $|B|$, полученные спектры мощности альфвеновских (АВ), быстрых (БМЗВ) и медленных магнитозвуковых волн (ММЗВ), а также их сумма (АВ+ММЗВ+БМЗВ) для 21 марта 2021 г. Указан 95 % доверительный интервал. Использованы одноминутные данные измерений параметров ММП и СВ на космическом аппарате WIND

сена на счет замороженных в плазму статических колебаний и различных разрывов, которые всегда присутствуют в СВ. Это подтверждается нашими расчетами спектров МГД-волн для многих тысяч реализаций данных измерений параметров ММП и СВ на разных космических аппаратах при разных уровнях солнечной активности. На рис. 7 показаны полу-

ченные нами спектры мощности флуктуаций АВ, БМЗВ и медленных магнитозвуковых волн (ММЗВ), их сумма, а также наблюдаемый спектр модуля ММП. Как видно на рис. 7, в пределах 95 % доверительного интервала сумма спектров всех трех типов МГД-волн хорошо совпадает с наблюдаемым спектром модуля ММП. Это еще раз подтверждает корректность используемых нами методов идентификации МГД-волн в бесстолкновительной плазме СВ.

ВЫВОДЫ

На основе проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Появление выраженных пиков в вариациях коэффициента когерентности флуктуаций интенсивности КЛ, соответствующих инерционному участку спектра турбулентности СВ, указывает на присутствие в межпланетной среде БМЗВ.
2. Показана возможность определения вклада всех трех ветвей МГД-волн в СВ (альфвеновских, быстрых и медленных магнитозвуковых) в наблюдаемые спектры мощности флуктуаций модуля ММП на инерционном участке спектра турбулентности СВ ($10^{-4} < \nu < 10^{-1}$ Гц) методами спектрального анализа на основе данных прямых измерений ММП и параметров СВ.
3. Показана возможность определения поляризационных характеристик (плоскости поляризации, эллиптичности, направления вращения и угла поляризации) и направления распространения МГД-волн

магнитозвукового и альфвеновского типа на основе данных прямых измерений ММП.

4. Показано, что при корректном определении спектров трех типов МГД-волн их сумма в пределах ошибок удовлетворительно совпадает с наблюдаемыми спектрами модуля ММП, при этом небольшая разница между ними может быть отнесена на счет замороженных в плазму СВ статических неоднородностей и колебаний, а также различных видов разрывов, которые всегда присутствуют в межпланетной среде.

Авторы благодарят команды космических аппаратов ACE и WIND, а также ACE Science Center и NASA/Goddard Space Flight Center за свободный доступ к данным измерений параметров межпланетной среды.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-22-20045 с использованием оборудования уникальной научной установки «Российская национальная наземная сеть станций космических лучей».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бережко Е.Г., Стародубцев С.А. Природа динамики спектра флуктуаций космических лучей. *Изв. АН СССР. Серия физическая*. 1988. Т. 52. С. 2361–2363.
- Дженкинс Г., Ваттс Д. *Спектральный анализ и его приложения*. М.: Мир, 1971. Вып. 1. 317 с.
- Канасевич Э.Р. *Анализ временных последовательностей в геофизике*. М.: Недра, 1985. 401 с.
- Коваленко В.А. *Солнечный ветер*. М.: Наука, 1983. 273 с.
- Куликовский А.Г., Любимов Г.А. *Магнитная гидродинамика*. М.: Физматлит, 1962. 246 с.
- Отнес Р., Эноксон Л. *Прикладной анализ временных рядов. Основные методы*. М.: Мир, 1982. 430 с.
- Стародубцев С.А., Транский И.А., Веригин М.И., Котова Г.А. Флуктуации интенсивности космических лучей и межпланетного магнитного поля в области взаимодействия потоков солнечного ветра с различной скоростью. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1996. Т. 36. С. 134–138.

Топтыгин И.Н. *Космические лучи в межпланетных магнитных полях*. М.: Наука, 1983. 304 с.

Транский И.А., Стародубцев С.А. Поляризационные параметры крупномасштабной турбулентности солнечного ветра и флуктуации интенсивности космических лучей. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1991. Т. 31. С. 27–33.

Luttrell A.H., Richter A.K. A study of MHD fluctuations upstream and downstream of quasi-parallel interplanetary shocks. *J. Geophys. Res.* 1987. Vol. 92. P. 2243–2252.

Neugebauer M., Wu C.S., Huba J.D. Plasma fluctuations in the solar wind. *J. Geophys. Res.* 1978. Vol. 83. P. 1027–1034.

Owens A.J. Cosmic-ray scintillations .2. General theory of interplanetary scintillations. *J. Geophys. Res.* 1974. Vol. 79. P. 895–906.

URL: <https://ysn.ru/ipm> (дата обращения 22 февраля 2023 г.).

URL: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/sc_merge_min1.html (дата обращения 22 февраля 2023 г.).

URL: <https://lweb.cfa.harvard.edu/shocks> (дата обращения 22 февраля 2023 г.).

URL: <https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/index.html> (дата обращения 22 февраля 2023 г.).

Статья подготовлена по материалам Восемнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 6–10 февраля 2023 г., ИКИ РАН, Москва, Russia.

Как цитировать эту статью:

Стародубцев С.А., Зверев А.С., Гололобов П.Ю., Григорьев В.Г. Флуктуации космических лучей и МГД-волны в солнечном ветре. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 2. С. 78–85. DOI: [10.12737/szf-92202309](https://doi.org/10.12737/szf-92202309).