

**МГД-ВОЛНЫ В ОБЛАСТИ ПРЕДФРОНТА МЕЖПЛАНЕТНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ
10 МАЯ 2024 Г.****MHD WAVES IN THE PRE-FRONT REGION OF THE INTERPLANETARY SHOCK
ON MAY 10, 2024****С.А. Стародубцев** *Институт космических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, starodub@ikfia.ysn.ru***S.A. Starodubtsev***Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, starodub@ikfia.ysn.ru*

Аннотация. Сообщается об изучении динамических изменений турбулентной составляющей ММП от спокойного периода 7 мая 2024 г. до момента прихода межпланетной ударной волны (МУВ) во второй половине 10 мая 2024 г. Для достижения поставленной цели к анализу привлечены одноминутные данные прямых измерений параметров межпланетной среды на космических аппаратах (КА) ACE, DSCOVR и WIND. Методами спектрального анализа изучается эволюция спектров мощности флуктуаций модуля ММП и МГД-волн на инерционном участке спектра турбулентных флуктуаций СВ на частотах $\sim 2.5 \cdot 10^{-4} - 8.3 \cdot 10^{-3}$ Гц. Определен вклад альфвеновских, быстрых и медленных магнитозвуковых волн в наблюдаемый спектр мощности флуктуаций модуля ММП, измеряемого на каждом из трех КА, и установлены спектры мощности МГД-волн этих типов. Показано, что мощность спектров флуктуаций модуля ММП и МГД-волн более чем на порядок величины возрастает по мере приближения МУВ в точку ее регистрации на КА. Сделан вывод, что это является следствием генерации МГД-волн потоками штормовых частиц — космических лучей (КЛ) с энергиями ~ 1 МэВ, наблюдающихся в области перед фронтом МУВ. На основе анализа совокупности всех данных измерений сделано предположение, что значительный рост потоков КЛ низких энергий (~ 1 МэВ) и уровня турбулентности солнечного ветра может привести к изменению направления ММП в области, примыкающей к фронту МУВ.

Ключевые слова: МГД-волны, солнечный ветер, межпланетное магнитное поле, межпланетная ударная волна.

Abstract. The article reports on the study of the dynamics of the IMF turbulent component from the quiet period on May 7, 2024 to the arrival of an interplanetary shock wave in the second half of May 10, 2024. To achieve the stated goal, 1-minute direct measurements of interplanetary medium parameters on the ACE, DSCOVR, and WIND spacecraft are involved in the analysis. Spectral analysis methods are used to study the evolution of power spectra of fluctuations in IMF modulus and MHD waves in the inertial portion of the SW turbulence spectrum at frequencies $\sim 2.5 \cdot 10^{-4} - 8.3 \cdot 10^{-3}$ Hz. The contribution of Alfvén, fast, and slow magnetosonic waves to the observed power spectrum of the IMF modulus measured by each of the three spacecraft is determined, and power spectra of MHD waves of these types are identified. It is shown that the power of the spectra of fluctuations in the IMF modulus and MHD waves increases by more than an order of magnitude as the shock wave approaches the point of its recording on the spacecraft. It is concluded that this is due to the generation of MHD waves by fluxes of energetic storm particles (ESP) — cosmic rays with energies ~ 1 MeV, observed in the region ahead of the interplanetary shock wave front. Analysis of all measurement data allows for the assumption that a significant increase in low-energy CR fluxes (~ 1 MeV) and SW turbulence levels may lead to a change in the IMF direction in the region adjacent to the IPS front.

Keywords: MHD waves, solar wind, interplanetary magnetic field, interplanetary shock.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из актуальных направлений исследований в области физики космоса является прогноз космической погоды. Для этого привлекаются данные наблюдений различных приборов, которые установлены как на Земле, так и на космических аппаратах (КА), а также разрабатываются различные прогностические модели. При построении прогноза необходимо учитывать текущее состояние межпланетной среды и иметь представление о физических процессах, которые протекают в плазме солнечного ветра (СВ) при тех или иных условиях.

При этом межпланетное магнитное поле (ММП) является важным компонентом космической плазмы. Оно играет значительную роль в генерации и распространении космических лучей (КЛ) в гелиосфере, а также в возникновении геомагнитных бурь и формировании различного типа пульсаций в магнитосфере Земли. Во многих случаях, немаловажное значение имеет и его турбулентная составляющая.

В научной литературе широко обсуждаются свойства турбулентности в СВ, в том числе и в окрестности фронтов межпланетных ударных волн (МУВ). В них изучаются различные характеристики флуктуаций модуля и компонент ММП, плотности и скорости

на разных участках наблюдаемого спектра турбулентности СВ (см. например, [Li et al., 2005; Hu et al., 2013; Borovsky, 2020; Pitna et al., 2021; Сапунова и др., 2024; Kim, Oh, 2024; Smith, Vasquez, 2021, 2024.]). В этих работах, в частности, отмечается, что в области перед фронтами МУВ часто наблюдается повышение мощности флуктуаций различных компонентов межпланетной среды в широкой области частот, соответствующих энергетическому, инерционному и диссипативному участкам спектра турбулентности СВ. При этом наблюдаются также изменения показателей наклонов спектров в соответствующим им точках перегибов спектров. Кроме того, в работе [Smith, Vasquez, 2021] обращается внимание на тот факт, что, несмотря на постоянное улучшение качества получаемых на КА данных, фундаментальные вопросы физики плазмы, связанные с диссипацией энергии и наблюдаемым нагревом тепловой плазмы, до сих пор во многом остаются без ответа. При этом одной из причин этого является недостаточное количество многоточечных измерений параметров ММП и СВ на КА, которые расположены достаточно близко друг от друга, что позволило бы более качественно изучить трехмерную динамику турбулентных явлений, которая лежит в основе многих происходящих в плазме СВ физических процессов.

В связи с этим представляет интерес всестороннее изучение мощных гелиогеофизических событий, произошедших в первой половине мая 2024 г. В это время после целой серии солнечных вспышек рентгеновского класса X, сопровождающихся множественными корональными выбросами массы [Ram et al., 2024; Lazzús, Salfate, 2024], на орбите Земли наблюдались значительные изменения космической погоды и, как следствие этого, разного рода ее геофизические проявления. В частности, прохождение сильной МУВ во второй половине 10 мая 2024 г. вызвало мощную геомагнитную бурю с внезапным началом (SSC) (рис. 1, а). Она началась в 17:05 UT 10 мая [https://www.obsebre.es/php/geomagnetisme/vrapides/sc_2024_p.txt] и была самой мощной за последние два десятилетия после известного события 20 ноября 2003 г., известного в научной литературе как Halloween Event. Эта буря сопровождалась большим эффектом Форбуша (см. рис. 1, б), мощными полярными сияниями, которые наблюдались даже на низких широтах [Lazzús, Salfate, 2024], и необычной реакцией низкоширотной ионосферы вблизи экваториальной аномалии в Индии [Jain et al., 2025]. Кроме того, 11 мая 2024 г. мировой сетью нейтронных мониторов было зарегистрировано наземное возрастание космических лучей (GLE74) [https://www.nmdb.eu]. Поэтому это неординарное гелиогеофизическое событие требует всестороннего изучения.

Настоящая статья является продолжением нашей предыдущей работы [Стародубцев, Шадрин, 2024] и посвящена экспериментальному изучению генерации, свойствам и эволюции МГД-турбулентности СВ в области предфронта МУВ, которая была зарегистрирована группировкой из трех, находящихся на относительно небольшом расстоянии друг от друга, КА во второй половине 10 мая 2024 г., и которая вы-

звала ряд ярких проявлений космической погоды на Земле.

1. ДАННЫЕ И МЕТОД

В работе использовались одночасовые данные о *Dst*-индексе геомагнитной возмущенности [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html] и одночасовые исправленные на давление данные регистрации интенсивности КЛ на ст. «Якутск» и «Бухта Тикси» [https://www.ysn.ru/ipm]. К анализу привлекались также одночасовые данные по КЛ, которые были зарегистрированы на КА ACE детектором LEMS120 в эксперименте EPAM. Этот прибор предназначен для измерения потоков КЛ низких энергий (главным образом протонов) в восьми различных дифференциальных энергетических каналах: 0.047–0.068, 0.068–0.115, 0.115–0.195, 0.195–0.321, 0.321–0.580, 0.587–1.06, 1.06–1.90 и 1.90–4.80 МэВ [https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/level2/index.html].

В целях изучения свойств турбулентной составляющей ММП и для идентификации МГД-волн были привлечены одноминутные данные прямых измерений параметров ММП и СВ группировки из трех КА: Deep Space Climate Observatory (DSCOVR), Advanced Composition Explorer (ACE) и WIND, находящихся вблизи точки либрации L1. Подробная информация об этих КА и данные регистрации различных параметров межпланетной среды находятся в открытом доступе по адресам [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ftpbrowser/wind_min_merge.html; https://services.swpc.noaa.gov/json/rtsw/rtsw_mag_1m.json; https://services.swpc.noaa.gov/json/rtsw/rtsw_wind_1m.json]. Нужно специально отметить, что данные измерений на борту КА являются первичными, в них присутствуют небольшие пропуски и сбои, поэтому к их использованию необходимо подходить с осторожностью.

При анализе данных измерений КА учитывалось и положение каждого из них в околоземном космическом пространстве [https://sscweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/Locator.cgi].

При использовании всей совокупности данных КА изучались спектральные характеристики ММП и МГД-волн и их динамические изменения на инерциальном участке спектра турбулентных флуктуаций СВ на частотах $\sim 2.5 \cdot 10^{-4}$ – $8.3 \cdot 10^{-3}$ Гц. Отметим, что первая из частот примерно соответствует границе между энергетическим и инерциальным участками спектра турбулентных флуктуаций СВ, которая изменяется на небольшую величину с циклом солнечной активности [Коваленко, 1983], а вторая определяется частотой Найквиста $\nu_N = 1/(2\Delta t)$, где $\Delta t = 60$ с — шаг дискретизации используемых данных. Для выделения полезной информации из данных прямых измерений применялись методы спектрального анализа, в основе которых лежит алгоритм Блэкмена — Тьюки с корреляционным окном Тьюки [Дженкинс, Ваттс, 1971; Отнес, Эноксон, 1982]. Его использование позволило построить оценки спектров мощности флуктуаций ММП с достаточно небольшим 95%-м доверительным интервалом, соответствующим числу степеней свободы, равному 66.675 [Дженкинс, Ваттс, 1971]. Перед этим все исходные временные ряды дан-

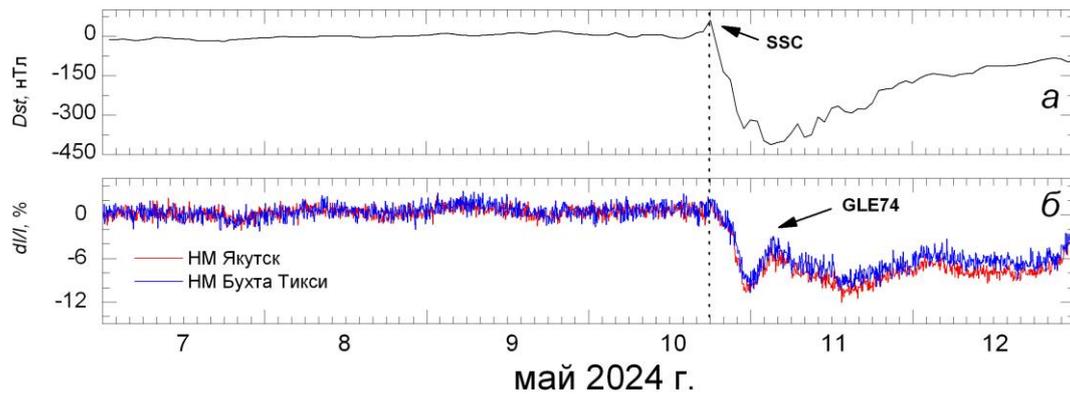


Рис. 1. Dst -индекс геомагнитной активности (а) и интенсивность КЛ по измерениям нейтронных мониторов (НМ) на ст. «Якутск» и «Бухта Тикси» (б) 7–12 мая 2024 г. Пунктир — начало геомагнитной бури и эффекта Форбуша 10 мая 2024 г., стрелки — внезапное начало магнитной бури (SSC) и наземное возрастание КЛ (GLE74)

ных подвергались стандартной процедуре подготовки к анализу. На этом этапе из данных исключались наблюдающиеся сбои и выбросы, при этом образовавшиеся пропуски в исходных рядах заполнялись значениями, полученными интерполяцией соседних измерений. Далее все временные ряды данных приводились к нулевому среднему, а затем подвергались процедуре фильтрации с помощью цифрового полосно-пропускающего фильтра в указанной выше полосе частот [Отнес, Эноксон, 1982].

Нужно заметить, что при изучении свойств флуктуаций ММП часто рассматривают спектральные характеристики его модуля и компонент. Это обусловлено тем, что по виду спектров можно сделать определенное и обоснованное заключение о наличии в СВ продольных или поперечных волн и колебаний в анализируемые интервалы времени. В частности, известно, что для поперечных альфвеновских волн наблюдаются флуктуации направления, а не величины поля. И в этом случае разница между спектрами мощности компонент и модуля ММП может достигать порядка величины. А для быстрой моды (волн сжатия) наблюдаются спектры мощности компонент и модуля ММП одного порядка, что указывает на флуктуации и направления, и величины ММП [Коваленко, 1983]. Однако по виду этих спектров мощности флуктуаций ММП невозможно сделать заключение о вкладе МГД-волн определенного типа в спектры, наблюдаемые в СВ. Но все они так или иначе вносят свой вклад в модуль ММП. Поэтому в работе при установлении спектральных характеристик МГД-волн разных типов учитывались их известные свойства. Они заключаются в том, что для альфвеновских волн (АВ) характерна корреляция между модулем ММП V и скоростью СВ V ; для быстрых магнитозвуковых волн (БМЗВ) — между V и плотностью плазмы n , а для медленных магнитозвуковых волн (ММЗВ) — между n и V [Neugebauer et al., 1978; Топтыгин, 1983]. Но поскольку в этой работе изучаются спектральные свойства флуктуаций ММП, то вместо использования коэффициента корреляции, который характеризует связь между определенными физическими величинами во временной области, используется коэффициент когерентности, который является обобщением понятия

корреляции на частотную область [Luttrell, Richter, 1986, 1987; Стародубцев и др., 2023]. Нужно отметить, что по определению коэффициент когерентности есть положительное значение квадратного корня из функции когерентности. Он изменяется от 0 до 1 и также является функцией частоты. Используемая в данной работе процедура оценок спектральных характеристик флуктуаций параметров ММП и плазмы СВ, соответствующих коэффициентов когерентности, а также методика идентификации МГД-волн и их отличие от колебаний детально описаны в [Стародубцев и др., 2023].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2–4 показаны модуль B и B_z -компонента ММП (а), плотность n (б), скорость V (в) и температура T (г), зарегистрированные каждым из трех КА 7–12 мая 2024 г. Пунктиром показано время прихода МУВ на каждый КА. Ее приход на КА DSCOVR был зарегистрирован 10 мая 2024 г. в 16:35 UT (см. рис. 2), на КА ACE — в 16:37 UT (см. рис. 3), на WIND — в 17:05 UT (см. рис. 4). Видно (см. рис. 2–4), что начиная с 7 мая до прихода на орбиту Земли крупномасштабного возмущения СВ (выброса корональной массы сопровождавшимся МУВ) во второй половине 10 мая условия в околоземном космическом пространстве были относительно спокойными, а параметры ММП и СВ не испытывали каких-либо значительных изменений несмотря на достаточно высокие средние значения n , V , T СВ [Топтыгин, 1983].

На рис. 5, а–в в системе координат GSE показано расположение группировки трех КА относительно Земли 7 мая 2024 г. Расстояние дано в радиусах Земли R_E . Синие отрезки — направление вектора среднего ММП в разных проекциях на плоскости YX (а), ZX (б) и ZY (в). По сравнению с расстоянием от Солнца до Земли ($1 \text{ а.е.} \approx 285185 R_E$) все КА расположены достаточно близко друг к другу. Тем не менее, можно отметить, что КА WIND находится несколько в стороне от Земли и двух остальных КА на расстоянии $\sim 100R_E$ (рис. 5, а, в). При этом видно, что направление среднего ММП в этот период времени на всех КА практически одно и то же.

Рассмотрим теперь спектральные характеристики турбулентности СВ на основе результатов анализа

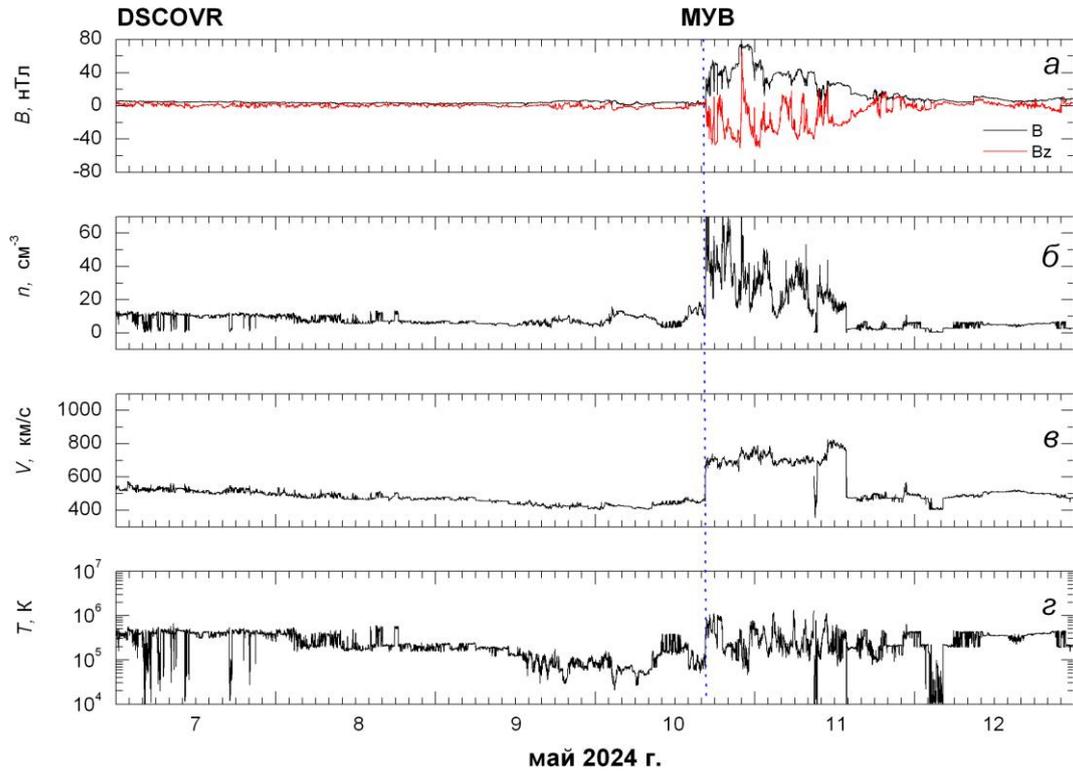


Рис. 2. Модуль B и B_z -компоненты ММП (a), плотности n (b), скорости V (c) и температуры T (d) СВ измеренные КА DSCOVR 7–12 мая 2024 г. Пунктир — время прихода МУВ

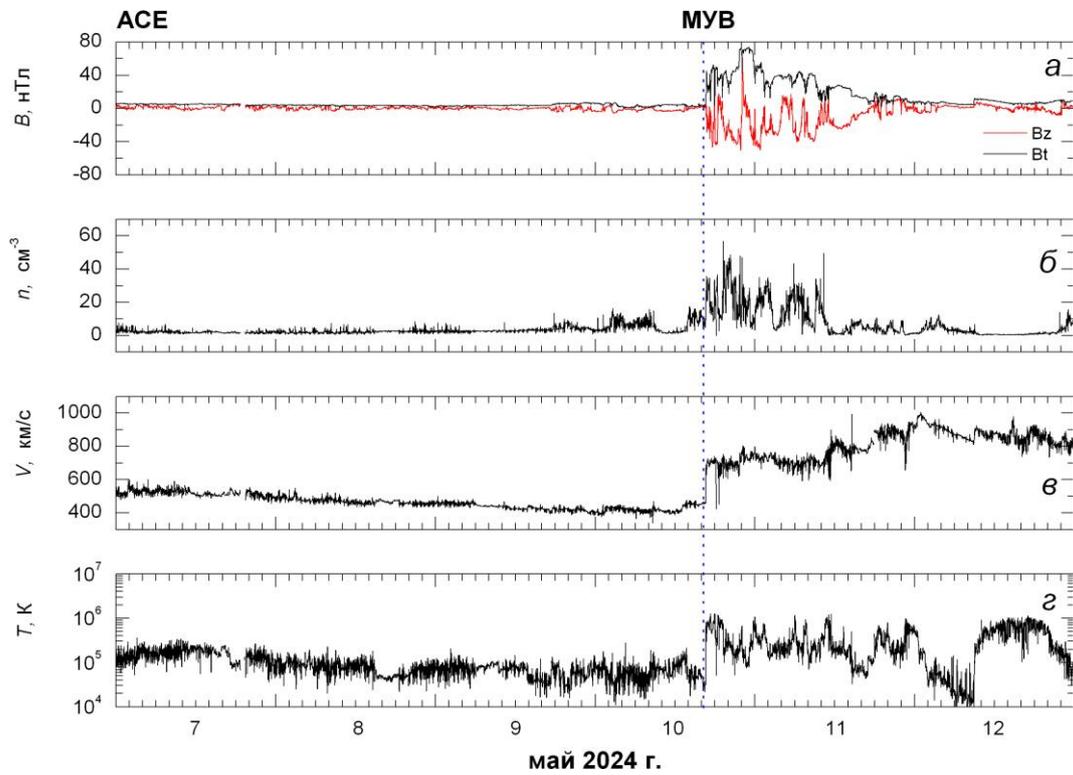


Рис. 3. То же для КА ACE

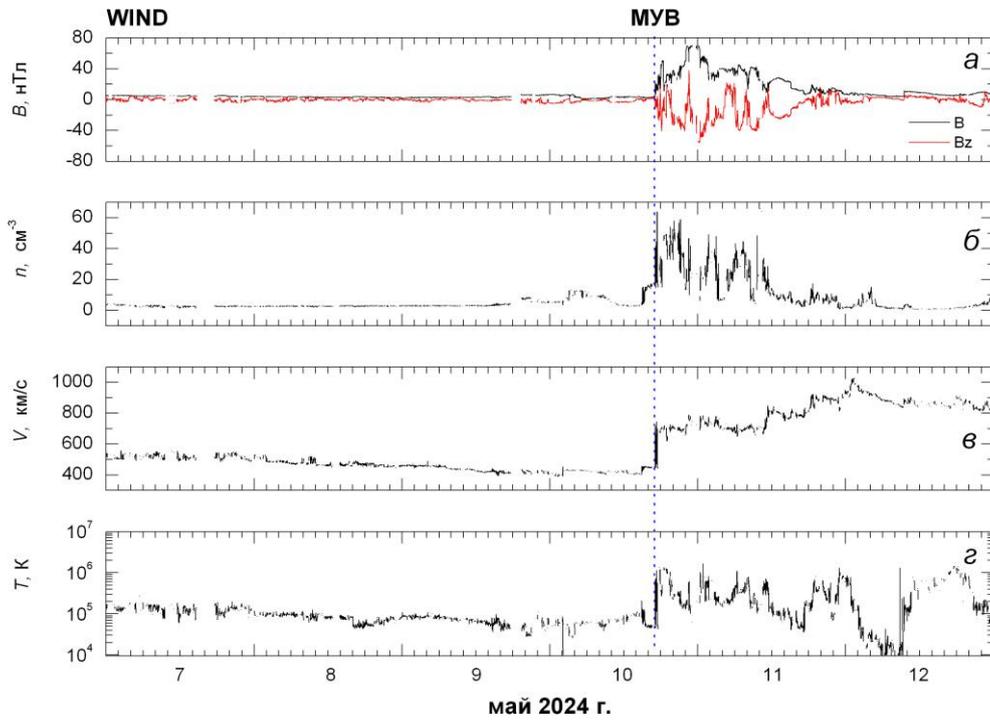


Рис. 4. То же для КА WIND

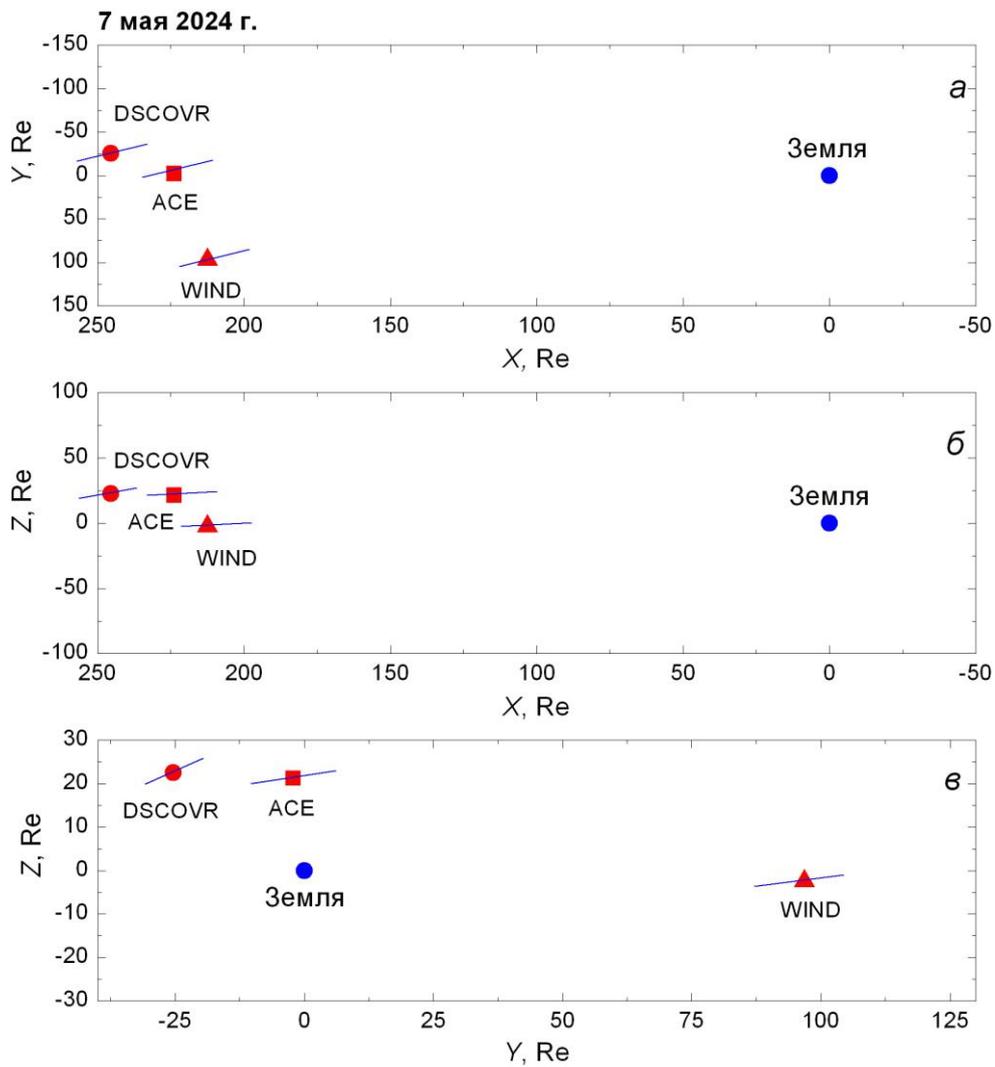


Рис. 5. Расположение группировки трех КА DSCOVR, ACE и WIND в спокойный период 7 мая 2024 г. относительно Земли в проекции на разные плоскости в системе координат GSE. Синие отрезки — направление среднего ММП на каждом КА в этот день

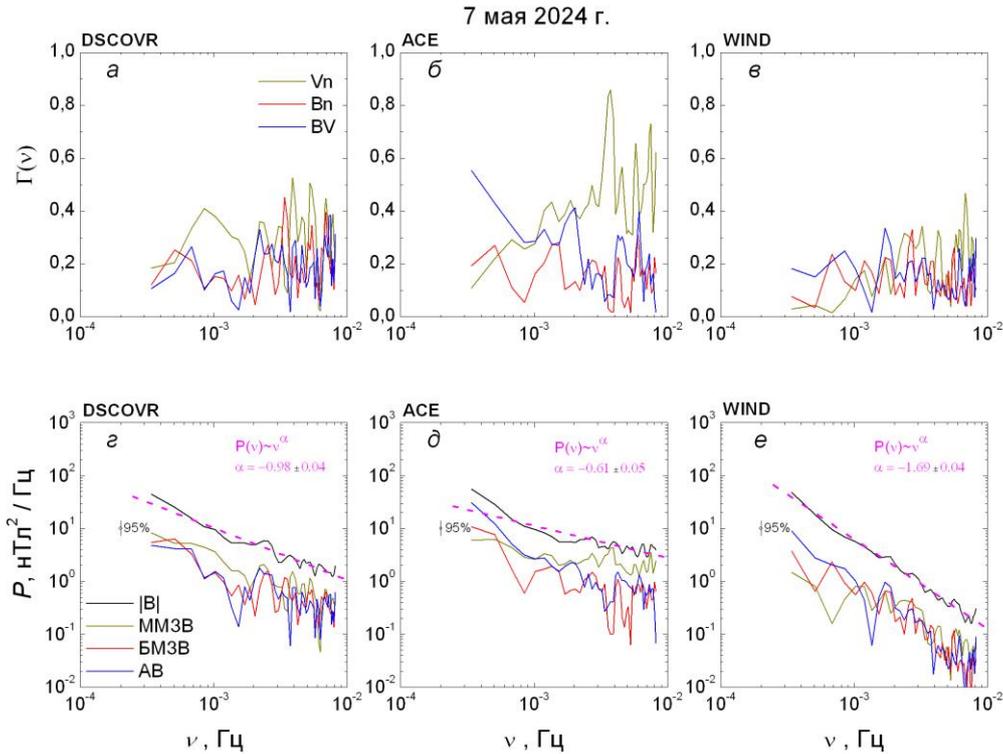


Рис. 6. Коэффициенты когерентности $\Gamma_{BV}(v)$, $\Gamma_{Bn}(v)$ и $\Gamma_{Vn}(v)$ (а–в), а также спектры мощности флуктуаций модуля ММП и установленные спектры мощности МГД-волн (z–e) для спокойного периода времени 7 мая 2024 г. Штриховая линия — аппроксимация спектров мощности флуктуаций модуля ММП; приведен описывающий их степенной закон. Показаны соответствующие легенды (а, z) для когерентностей и спектров мощности и 95 % доверительные интервалы для спектров мощности. Над каждой панелью — соответствующие названия КА

одноминутных данных прямых измерений параметров межпланетной среды на трех КА. Начнем рассмотрение со спокойного периода времени 7 мая 2024 г. На рис. 6, а–в показаны рассчитанные коэффициенты когерентности $\Gamma_{BV}(v)$, $\Gamma_{Bn}(v)$ и $\Gamma_{Vn}(v)$ как функции частоты ν . Их значения определяют вклад МГД-волн одного из типов в наблюдаемый спектр мощности флуктуаций модуля ММП на определенной частоте ν . Видно, что значения когерентности не очень велики, за исключением $\Gamma_{Vn}(3.5 \cdot 10^{-3} \text{ Гц}) = 0.86$ и $\Gamma_{BV}(3.4 \cdot 10^{-4} \text{ Гц}) = 0.55$ (панель б), что означает значительный вклад ММЗВ и АВ в наблюдаемый спектр мощности флуктуаций модуля ММП на этих частотах (панель д) в рассматриваемый период времени. Что же касается вклада в него МГД-волн остальных типов на других частотах, то в целом он существенно меньше и не превышает 50 %. Вообще, чтобы установить частотные спектры МГД-волн определенного типа нужно умножить спектры мощности флуктуаций модуля ММП $P(v)$ на соответствующие значения коэффициента когерентности $\Gamma(v)$, которые рассчитаны для каждого КА. На панелях (z–e) показаны наблюдаемые спектры мощности флуктуаций модуля ММП, их аппроксимация методом наименьших квадратов и соответствующие степенные законы, которые их описывают. Необходимо отметить, что соответствующие показатели степени для КА DSCOVR и ACE имеют значения большие -1 , а для WIND — наоборот, значительно меньше -1 . Начиная с 8 мая по мере приближения к фронту МУВ показатели спектров, рассчитанные по данным КА ACE и DSCOVR, постепенно уменьшаются, стремясь к известному по-

казателю колмогоровского спектра турбулентности $-5/3$, а для WIND они достигают этого значения скачком и остаются практически такими же вплоть до ударного фронта. Возможно, это как-то связано с положением КА WIND относительно Земли и других КА, от которых он находится на расстоянии около $100R_E$ по оси Y вне границы ее магнитосферы (см. рис. 5 и 9).

На рис. 6, z–e показаны также и установленные спектры МГД-волн всех трех типов — АВ, БМЗВ и ММЗВ. Как и ожидалось, их значения не превышают значения спектров мощности флуктуаций модуля ММП, а их суммы в пределах 95 % доверительных интервалов сравнимы со спектрами мощности флуктуаций модуля ММП, измеренного каждым КА. При этом максимальные величины спектров мощности в рассматриваемой области частот вполне соответствуют спокойной ситуации в СВ [Коваленко, 1983] и даже на низкой частоте $2.5 \cdot 10^{-4} \text{ Гц}$ их значения не превышают $10^2 \text{ нТл}^2/\text{Гц}$.

Другая картина наблюдается непосредственно перед приходом МУВ. На рис. 7, а–е для интервала времени перед приходом МУВ приведена та же информация, что и на рис. 6, а–е. Видно, что изменились значения всех коэффициентов когерентности $\Gamma(v)$, а спектр мощности флуктуаций модуля ММП вырос на порядок величины, при этом он стал более крутой с показателями степени меньше -1 . Это в полной мере относится и к каждому спектру, характеризующему МГД-волну определенного типа (см. рис. 7, z–e). Причем за фронтом МУВ в переходной турбулентной области показатели спектров на трех КА резко

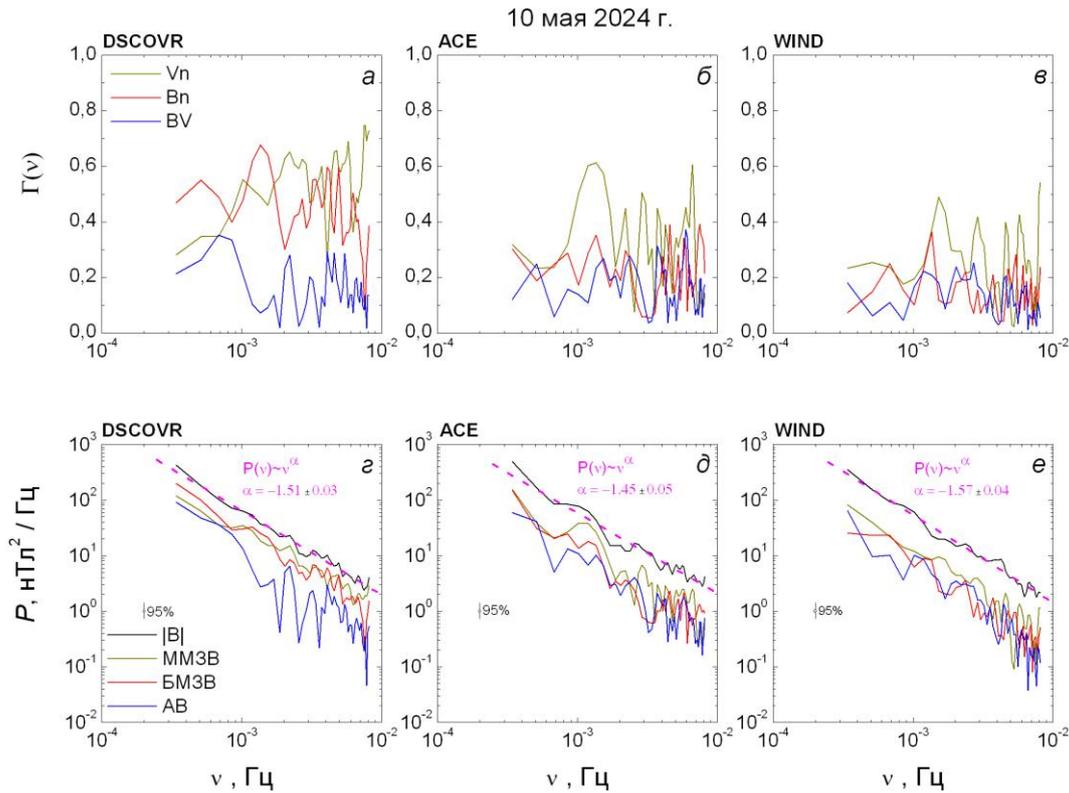


Рис. 7. То же для области предфронта МУВ 10 мая 2024 г.

в течение 2–3 ч падают до значений $-(2.0 \pm 2.2)$, а затем медленно стремятся восстановиться до значений $-5/3$.

Обращает на себя внимание форма спектра мощности флуктуаций модуля ММП, рассчитанного по данным КА WIND (см. рис. 6, e и 7, e). В области предфронта МУВ он также возрастает на порядок величины, но в обоих случаях его показатель $\alpha < -1$. Это вызывает определенный вопрос, но, возможно, это связано со спагетти-структурой ММП перед фронтом МУВ или с волнистой структурой самого фронта МУВ, что мы предположили ранее в [Стародубцев, Шадрина, 2024].

Более детальный анализ динамики спектров мощности флуктуаций модуля ММП и МГД-волн показывает, что по мере приближения МУВ к КА спектры становятся все более крутыми, а их спектральная мощность возрастает. Почему это происходит, можно понять, если принять во внимание теоретические работы [Бережко, 1986, 1990; Чалов, 1988; Бережко, Стародубцев, 1988; Reames, 1989; Vainio, 2003], в которых показана возможность генерации МГД-волн потоками КЛ низких энергий. Эти авторы разработали механизмы генерации альфвеновских и магнитозвуковых волн за счет развития плазменных неустойчивостей в межпланетной среде солнечными КЛ низких энергий или частицами, ускоренными на фронтах МУВ, которые в научной литературе называют энергичными штормовыми частицами. Определяющим фактором в этих процессах является наличие в межпланетной среде КЛ низких энергий (~ 1 МэВ), характеризующихся большими потоками и градиентами. Действительно, в рассматриваемое время такие потоки КЛ после серии мощных вспышек на Солнце наблю-

дались на орбите Земли. На рис. 8, как и на рис. 2–4, показаны первичные данные. Видно, что начиная с 8 мая 2024 г. по мере приближения к КА ACE на много порядков величины возрастает поток низкоэнергичных КЛ, который состоит из солнечных и энергичных штормовых частиц с максимумом на фронте МУВ и характеризуется большим пространственным градиентом. С учетом результатов вышеупомянутых работ это позволяет сделать обоснованное заключение о причине наблюдаемого повышения уровня флуктуаций ММП, вызванного генерацией этими частицами МГД-волн в области предфронта МУВ 10 мая 2024 г.

Интересен тот факт, что в отличие от показанной на рис. 5 ситуации непосредственно в области предфронта МУВ наблюдается изменение направления среднего ММП на всех трех КА, достаточно близко расположенных относительно друг друга. Это показано на рис. 9. Можно предположить, что наличие значительных потоков штормовых частиц с энергией ~ 1 МэВ и соответствующий им рост уровня турбулентности СВ приводит к изменению направления среднего ММП в области пространства непосредственно примыкающей к фронту МУВ. Однако делать определенные выводы о причинах этого еще рано, поскольку в настоящее время набрана совсем небольшая статистика (всего 35 случаев) наблюдения подобных событий на достаточно близко расположенных относительно друг друга КА.

ВЫВОДЫ

Таким образом, на основании проведенного исследования события регистрации МУВ 10 мая 2024 г.

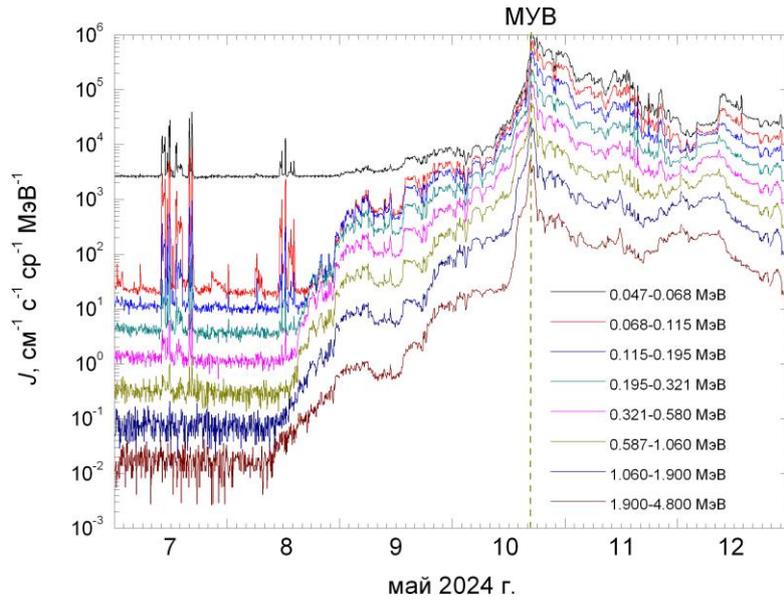


Рис. 8. Потоки низкоэнергичных КЛ в восьми различных дифференциальных каналах, зарегистрированные на борту КА ACE в эксперименте ЕРАМ (детектор LEMS120) 7–12 мая 2024 г. Приведена легенда для дифференциальных энергетических каналов. Штриховая линия — время прихода МУВ на КА ACE, совпадающее с максимумом потока КЛ разных энергий

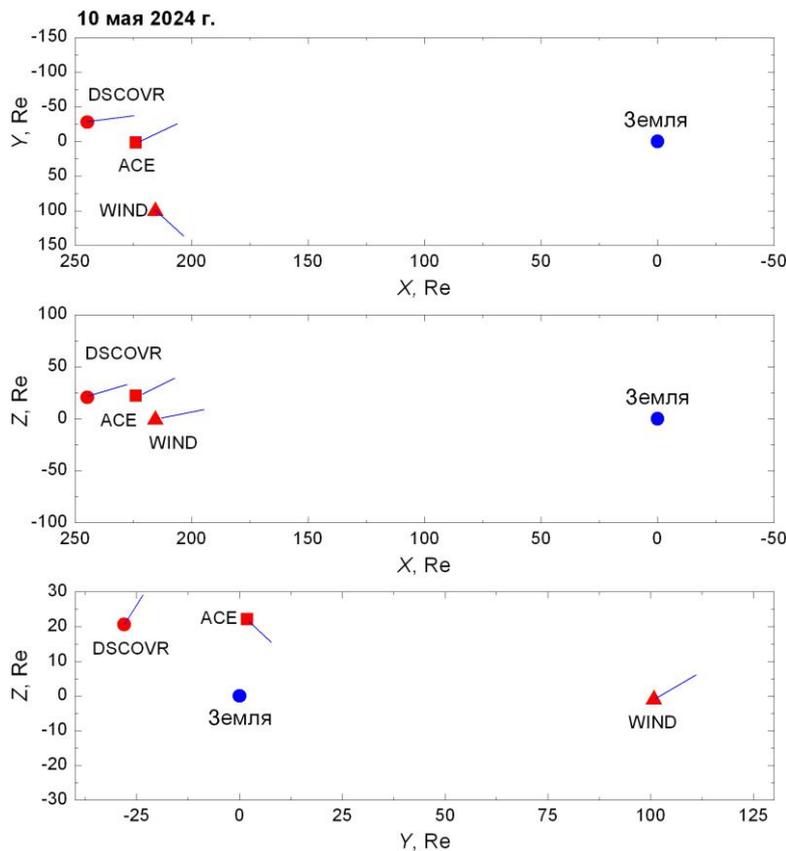


Рис. 9. То же, что на рис. 5, для области префронта МУВ, зарегистрированной группировкой из трех КА 10 мая 2024 г.

на трех КА, которые находятся вблизи точки либрации L1, можно сделать следующие выводы.

1. На основе методов спектрального анализа с использованием данных прямых измерений параметров ММП и плазмы СВ на трех КА DSCOVR, ACE и WIND определены МГД-волны трех типов: альфвеновские, БМЗВ и ММЗВ, наблюдающиеся в рас-

сматриваемый период времени на инерционном участке спектра турбулентности СВ в области частот $\sim 2.5 \cdot 10^{-4} - 8.3 \cdot 10^{-3}$ Гц.

2. Показано, что в данном событии наблюдается значительное почти на порядок увеличение мощности флуктуаций модуля ММП и МГД-волн всех трех установленных типов в области префронта МУВ.

3. Причиной этого являются КЛ низких энергий солнечного и межпланетного происхождения, характеризующиеся большими потоками и градиентами, наличие которых в области предфронта МУВ привели к генерации МГД-волн.

4. Предполагается, что значительный рост потоков КЛ низких энергий (~1 МэВ) и уровня турбулентности СВ может привести в изменению направления ММП в области пространства непосредственно примыкающей к фронту МУВ.

Автор благодарит сотрудников Space Weather Prediction Center of the National Oceanic and Atmospheric Administration, NASA/Goddard Space Flight Center, ACE Science Centers и Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism (Kyoto University) за предоставление свободного доступа к данным КА DSCOVR, ACE и WIND и информации о *Dst*-индексе геомагнитной активности.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИКФИА СО РАН FWRS-2021-0012.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бережко Е.Г. Неустойчивость в ударной волне, распространяющейся в газе с космическими лучами. *Письма в АЖ*. 1986, т. 12, с. 842–847.
- Бережко Е.Г. Генерация МГД-волн в межпланетной плазме потоками солнечных космических лучей. *Письма в АЖ*. 1990, т. 16, № 12, с. 1123–1132.
- 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, 316 с.
- Коваленко В.А. *Солнечный ветер*. М.: Наука, 1983, 272 с.
- Отнес Р., Эноксон Л. *Прикладной анализ временных рядов. Основные методы*. М.: Мир, 1982, 430 с.
- Сапунова О.В., Бородкова Н.Л., Ермолаев Ю.И., Застенкер Г.Н. Спектры флуктуаций параметров плазмы солнечного ветра вблизи фронта ударной волны. *Космические исследования*. 2024, т. 62, № 1, с. 3–12. DOI: [10.31857/S0023420624010018](https://doi.org/10.31857/S0023420624010018).
- Стародубцев С.А., Шадрина Л.П. МГД-волны в области предфронта межпланетных ударных волн 6 и 7 сентября 2017 г. *Солнечно-земная физика*. 2024, т. 10, № 3, с. 53–61. DOI: [10.12737/szf-103202406](https://doi.org/10.12737/szf-103202406) / Starodubtsev S.A., Shadrina L.P. MHD waves at the pre-front of interplanetary shocks on September 6 and 7, 2017. *Sol.-Terr. Phys.* 2024, vol. 10, iss. 3, pp. 50–57. DOI: [10.12737/stp-103202406](https://doi.org/10.12737/stp-103202406).
- 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) / Starodubtsev S.A., Zverev A.S., Gololobov P.Yu., Grigoryev V.G. Cosmic ray fluctuations and MHD waves in the solar wind. *Sol.-Terr. Phys.* 2023, vol. 9, iss. 2, pp. 73–80. DOI: [10.12737/stp-92202309](https://doi.org/10.12737/stp-92202309).
- Топтыгин И.Н. *Космические лучи в межпланетных магнитных полях*. М.: Наука, 1983, 304 с.
- Чалов С.В. Неустойчивость диффузионной ударной волны в плазме с космическими лучами. *Письма в АЖ*. 1988, т. 14, № 3, с. 272–276.
- Borovsky J.E. A statistical analysis of the fluctuations in the upstream and downstream plasmas of 109 strong compression interplanetary shocks at 1 AU. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2020, vol. 125, iss. 6, article id. e27518. DOI: [10.1029/2019JA027518](https://doi.org/10.1029/2019JA027518).
- Hu Q., Zank G.P., Li G., Ao X. A power spectral analysis of turbulence associated with interplanetary shock waves. *AIP Conf. Ser. 1539, Proc. of the Thirteenth International Solar Wind Conf.* 2013. 175. DOI: [10.1063/1.4811016](https://doi.org/10.1063/1.4811016).
- Jain A., Trivedi R., Jain S., Choudhary R.K. Effects of the super intense geomagnetic storm on 10–11 May, 2024 on total electron content at Bhopal. *Adv. Space Res.* 2025, vol. 75, iss. 1, pp. 953–965. DOI: [10.1016/j.asr.2024.09.029](https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.09.029).
- Kim S., Oh S. Characteristics of interplanetary shock sheath regions in the solar wind inducing the Forbush decreases. *J. Korean Astron. Soc.* 2024, vol. 57.
- Lazzús J.A., Salfate I. Report on the effects of the May 2024 Mother's day geomagnetic storm observed from Chile. *J. Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*. 2024, vol. 261, 106304. DOI: [10.1016/j.jastp.2024.106304](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2024.106304).
- Li G., Hu Q., Zank G.P. Upstream turbulence and the particle spectrum at CME-driven shocks. *Proc. AIP Conf. "Physics of Collisionless Shocks"*. 2005, vol. 781, pp. 233–239. DOI: [10.1063/1.2032702](https://doi.org/10.1063/1.2032702).
- Luttrell A.H., Richter A.K. Power spectra of low frequency MHD turbulence up- and downstream of interplanetary fast shocks within 1 AU. *Ann. Geophys.* 1986, vol. 4, pp. 439–446.
- Luttrell A.H., Richter A.K. Study of MHD fluctuations upstream and downstream of quasiparallel interplanetary shocks. *J. Geophys. Res.* 1987, vol. 92, pp. 2243–2252.
- Neugebauer M., Wu C.S., Huba J.D. Plasma fluctuations in the solar wind. *J. Geophys. Res.* 1978, vol. 83, pp. 1027–1034.
- Pitna A., Safrankova J., Nemecek Z., et al. Turbulence upstream and downstream of interplanetary shocks. *Frontiers in Physics*. 2021, vol. 8, id. 654. DOI: [10.3389/fphy.2020.626768](https://doi.org/10.3389/fphy.2020.626768).
- Ram T., Veenadhari S., Dimri B., et al. Super-intense geomagnetic storm on 10–11 May 2024: Possible mechanisms and impacts. *Space Weather*. 2024, vol. 22, iss. 12, e2024SW004126. DOI: [10.1029/2024SW004126](https://doi.org/10.1029/2024SW004126).
- Reames D.V. Wave generation in the transport of particles from large solar flares. *Astrophys. J. Lett.* 1989, vol. 342, no. 1, Part 2, pp. L51–L53.
- Smith C.W., Vasquez B.J. Driving and dissipation of solar-wind turbulence: what is the evidence? *Front. Astron. Space Sci.* 2021, vol. 7, id. 114. DOI: [10.3389/fspas.2020.611909](https://doi.org/10.3389/fspas.2020.611909).
- Smith C.W., Vasquez B.J. The unsolved problem of solar-wind turbulence. *Front. Astron. Space Sci.* 2024, vol. 11, id. 1371058. DOI: [10.3389/fspas.2024.1371058](https://doi.org/10.3389/fspas.2024.1371058).
- Vainio R. On the generation of Alfvén waves by solar energetic particles. *Astron. Astrophys.* 2003, vol. 406, pp. 735–740.
- URL: https://www.obsebre.es/php/geomagnetisme/vrapides/ssc_2024_p.txt (дата обращения 27 февраля 2025 г.).
- URL: <https://www.nmdb.eu> (дата обращения 27 февраля 2025 г.).
- URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> (дата обращения 27 февраля 2025 г.).
- URL: <https://www.ysn.ru/ipm> (дата обращения 27 февраля 2025 г.).
- URL: <https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/level2/index.html> (дата обращения 27 февраля 2025 г.).
- URL: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ftpbrowser/wind_min_merge.html (дата обращения 27 февраля 2025 г.).
- URL: https://services.swpc.noaa.gov/json/rtsw/rtsw_mag_1m.json (дата обращения 27 февраля 2025 г.).
- URL: https://services.swpc.noaa.gov/json/rtsw/rtsw_wind_1m.json (дата обращения 27 февраля 2025 г.).
- URL: <https://sscweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/Locator.cgi> (дата обращения 27 февраля 2025 г.).
- Статья подготовлена по материалам Двадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 10–14 февраля 2025 г., Институт космических исследований РАН, Москва, Russia.
- Как цитировать эту статью:
Стародубцев С.А. МГД-волны в области предфронта межпланетной ударной волны 10 мая 2024 г. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 3, с. 56–64. DOI: [10.12737/szf-113202507](https://doi.org/10.12737/szf-113202507).