

МГД-ВОЛНЫ В ОБЛАСТИ ПРЕДФРОНТА МЕЖПЛАНЕТНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН 6 И 7 СЕНТЯБРЯ 2017 Г. MHD WAVES AT THE PRE-FRONT OF INTERPLANETARY SHOCKS ON SEPTEMBER 6 AND 7, 2017

С.А. Стародубцев 

*Институт космофизических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, starodub@ikfia.ysn.ru*

Л.П. Шадрина 

*Академия наук Республики Саха,
Якутск, Россия, lushadr@mail.ru*

S.A. Starodubtsev

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, starodub@ikfia.ysn.ru*

L.P. Shadrina

*Academy of Sciences of the Republic of Sakha,
Yakutsk, Russia, lushadr@mail.ru*

Аннотация. В работе анализируются события сильных возмущений космической погоды в первой декаде сентября 2017 г. При этом используются данные *Dst*-индекса геомагнитной активности, параметров нормалей к фронтам межпланетных ударных волн, а также прямые измерения параметров межпланетного магнитного поля, плазмы солнечного ветра и космических лучей. С использованием спектрального анализа данных измерений параметров межпланетной среды проведен анализ МГД-волн в области предфронта двух межпланетных ударных волн, ответственных за геомагнитные возмущения 6 и 7 сентября 2017 г. Основные полученные результаты сводятся к следующему: установлен вклад трех веток МГД-волн (альфвеновских, быстрых и медленных магнитозвуковых) в наблюдаемый спектр модуля межпланетного магнитного поля. Подтвержден вывод, что генерация альфвеновских и быстрых магнитозвуковых волн обусловлена наличием потоков протонов с энергией $E_p \sim 1$ МэВ в области предфронта межпланетных ударных волн. При этом обнаружен преобладающий вклад медленных магнитозвуковых волн в наблюдаемый спектр модуля межпланетного магнитного поля, но причина этого остается неизвестной. Отмечается, что разная ориентация нормалей между фронтами межпланетных ударных волн и направлением среднего вектора межпланетного магнитного поля на достаточно близко расположенных относительно друг друга космических аппаратах может служить признаком волнистости структуры фронта ударной волны.

Ключевые слова: межпланетное магнитное поле, солнечный ветер, МГД-волны, межпланетная ударная волна, геомагнитная буря, космические лучи, форбуш-понижение.

Abstract. We analyze strong space weather disturbances during first ten days of September 2017, using the geomagnetic *Dst* index, parameters of normals to interplanetary shock fronts, direct measurements of interplanetary magnetic field, solar wind, and cosmic ray parameters. By applying spectral analysis methods to interplanetary medium data, we analyze MHD waves at the pre-front of two interplanetary shocks responsible for geomagnetic disturbances on September 6 and 7, 2017. The main results are as follows: the contribution of three branches of MHD waves (Alfvén, fast and slow magnetosonic) to the observed spectrum of the interplanetary magnetic field modulus has been established. We have confirmed the conclusion that the generation of Alfvén waves and fast magnetosonic waves is due to the presence of low-energy proton fluxes ($E_p \sim 1$ MeV) at the pre-front of interplanetary shocks. We have also discovered a predominant contribution of slow magnetosonic waves to the observed spectrum of the interplanetary magnetic field modulus, but its reason is yet unknown. It is noted that different orientations of the normals to the interplanetary shock fronts and to the direction of the interplanetary magnetic field average vector on spacecraft located fairly close to each other may indicate waviness of the shock front structure.

Keywords: interplanetary magnetic field, solar wind, MHD waves, interplanetary shock, geomagnetic storm, cosmic rays, Forbush decrease.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время изучение космической погоды является весьма актуальным направлением в области физики солнечно-земных связей. Особое значение эти исследования имеют для районов Крайнего Севера, где в настоящее время интенсивно развиваются различные секторы экономики, а наземные нега-

тивные проявления космической погоды носят наиболее выраженный характер. При этом основное внимание уделяется изучению различных параметров межпланетной среды, которые существенно изменяются при резких изменениях космической погоды. В связи с этим нужно отметить, что турбулентность солнечного ветра (СВ) является одним из важных

факторов космической погоды. Во многих работах главное внимание уделяется преимущественно альфвеновским волнам (АВ) большой амплитуды. Считается, что существенное влияние на развитие больших геомагнитных бурь и форбуш-понижений в галактических космических лучах (ГКЛ) оказывают АВ. Существует мнение [Borovsky, Funsten, 2003; Borovsky, 2023], что именно вклад АВ является одним из основных драйверов взаимодействия СВ с магнитосферой Земли. При этом эффект турбулентности интерпретируется как увеличение вязкого взаимодействия потоков СВ с магнитосферой, что, в частности, приводит к развитию геомагнитной бури. Например, в [Rezeau, Belmont, 2001] рассматривается вопрос о проникновении МГД-волн во внутреннюю магнитосферу через магнитопаузу. В [D'Amicis et al., 2022; Jankovicova et al., 2008] проведено сравнение характеристик альфвеновской турбулентности в быстром и медленном СВ и показано, что альфвеновские флуктуации присутствуют в потоках обоих типов. Ряд статей посвящен изучению связи МГД-турбулентности с крупномасштабными возмущениями СВ — межпланетными корональными выбросами массы (КВМ), энергичными штормовыми частицами, солнечными энергичными частицами и областями взаимодействия коротящих потоков СВ [Luttrell, 1986, 1987; Luttrell, Richter, 1987; Стародубцев и др., 2007; Grigoryev et al., 2008; Desai et al., 2012; Рязанцева и др., 2020; Gololobov et al., 2023].

Здесь под термином «энергичные штормовые частицы» понимается поток КЛ с $E \sim 1$ МэВ, отраженных или ускоренных на фронте квазипараллельных межпланетных ударных волн (МУВ). Поток этих частиц в течение ~ 1 сут до прихода ударной волны в точку регистрации возрастает на несколько порядков величины относительно фона и имеет максимум на фронте УВ.

В указанных выше работах были исследованы спектры мощности межпланетного магнитного поля (ММП) и флуктуации скорости и плотности СВ в инерционном диапазоне частот выше $\sim 10^{-4}$ Гц, возникающих как перед квазипараллельными быстрыми МУВ, так и после них. Однако вопрос о природе, т. е. механизме и месте генерации МГД-волн, до сих пор остается не до конца ясным.

В связи с этим целью настоящей работы является установление природы и распределения МГД-волн в инерционной области спектра турбулентности СВ в окрестности МУВ, вызвавших значительные геофизические эффекты в начале сентября 2017 г.

ДАННЫЕ И МЕТОД

В качестве исходных данных мы используем 1-часовые данные *Dst* [https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/index.html], данные нейтронного монитора ст. Апатиты [<http://pgia.ru/cosmicray>], интенсивности низкоэнергичных КЛ, измеренных на борту космического аппарата (КА) WIND [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ftpbrowser/wind_epact_ste_p_flux_hr.html], 1-минутные данные прямых измерений параметров ММП и СВ на КА WIND и DSCOVR

[https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/sc_merge_min1.html] и средние параметры нормалей к фронтам МУВ, зарегистрированных этими двумя КА [<https://lweb.cfa.harvard.edu/shocks>].

Для определения свойств МГД-волн на инерционном участке спектра турбулентности СВ в диапазоне частот $\sim 10^{-4} - 10^{-2}$ Гц использованы методика и техника расчетов различных спектральных характеристик параметров ММП и плазмы СВ, подробно описанная в [Стародубцев и др., 2023].

При идентификации МГД-волн мы учитывали, что для волн разных типов характерна корреляция (в нашем случае мы использовали ее аналог в частотной области — когерентность) между определенными параметрами межпланетной среды. Так, когерентность между модулем ММП B и скоростью СВ U характерна для АВ и определяет их вклад в наблюдаемый спектр турбулентности ММП, когерентность между модулем ММП и плотностью плазмы СВ n — для быстрых магнитозвуковых (БМЗ) волн, а когерентность между n и U является указанием на существование в межпланетной среде определенного количества медленных магнитозвуковых (ММЗ) волн [Топтыгин, 1983; Luttrell, 1986, 1987; Luttrell, Richter, 1987].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для достижения поставленной цели нами проведен анализ сильных возмущений межпланетной среды в начале сентября 2017 г. Наблюдавшиеся в это время изменения космической погоды на орбите Земли были обусловлены ростом спорадической вспышечной и корональной активности Солнца в области AR12673. В ней были зафиксированы несколько мощных вспышек рентгеновского класса M и X, которые сопровождалась генерацией солнечных КЛ низких и релятивистских энергий, а также КВМ [<https://umbra.nascom.nasa.gov/SEP>; <https://www.spaceweather.com>]. Различные наземные отклики этого межпланетного возмущения обсуждались с разных точек зрения в целом ряде работ (см., например, [Bruno et al., 2019; Clilver et al., 2018; Mishev et al., 2018; Сафаргалеев, Терещенко, 2019; Струминский и др., 2020; Кравцова, Сдобнов, 2021; Яхнин, Яхнина, 2022; Mostafa et al., 2022; Дэспирак и др., 2020; Despirak et al., 2023; Максимов и др., 2023].

На Земле в это время наблюдался ряд мощных геофизических эффектов. На рис. 1, $a-d$ показаны изменения параметров ММП и плазмы СВ в околоземном космическом пространстве ($a-e$) по измерениям на КА WIND и соответствующие им проявления в геомагнитном поле и интенсивности ГКЛ (e, d).

Как отмечено в [Mostafa et al., 2022], 6 сентября 2017 г. в 23:44 UT в геомагнитном поле было зарегистрировано внезапное начало бури SSC (e). Оно было обусловлено приходом первой межпланетной ударной волны (МУВ1) (рис. 1, $a-e$). При этом *Dst* достиг своего максимального значения +32 нТл в 02:00 UT 7 сентября, но самой магнитной бури ($Dst < -20$ нТл) зарегистрировано не было (e). Обычно принято считать главной причиной понижения *Dst*

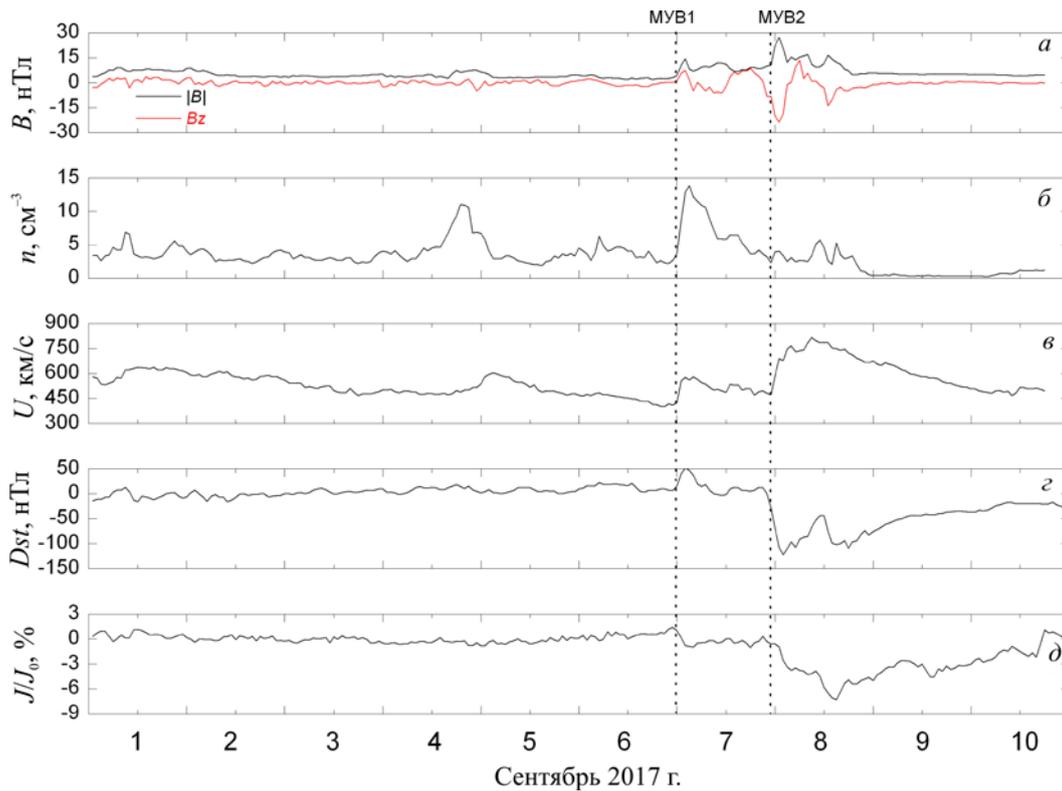


Рис. 1. Зависимость от времени модуля и B_z -компоненты ММП (а), плотности (б) и скорости СВ (в) по данным КА WIND, а также Dst (г) и интенсивности КЛ (д), зарегистрированной нейтронным монитором на станции КЛ Апатиты, для 1–10 сентября 2017 г. Вертикальные штриховые линии соответствуют моментам регистрации двух МУВ на КА WIND, находящимся вблизи точки либрации L1

во время магнитных бурь продолжительный поворот к югу B_z -компоненты ММП, однако в данном случае этого не наблюдалось. С приходом на Землю МУВ2 в ~21:00 UT 7 сентября началась большая геомагнитная буря, во время которой Dst в течение 5 ч (до ~02:00 UT 8 сентября) достиг минимального значения -142 нТл. Это связано с тем, что достигший орбиты Земли КВМ сопровождался магнитным облаком (МО) с продолжительными и большими отрицательными (южными) значениями B_z -компоненты ММП (~ -20 нТл) в конце дня 7 сентября. Еще одно МО с минимальным значением B_z ~ -18 нТл в середине дня 8 сентября вызвало интенсификацию этой геомагнитной бури: Dst начал восстанавливаться, но с 12 до 16 UT снова уменьшился с -63 до -122 нТл (панель г).

Отметим, что межпланетный КВМ состоит из трех частей: МУВ, область сжатия плазмы за ее фронтом и МО [Howard, 2011]. МУВ порождается самим КВМ при его движении со сверхальфвеновской относительно среды скоростью. Область сжатия плазмы является следствием взаимодействия МУВ с фоновыми параметрами СВ и характеризуется повышенным уровнем их турбулентных флуктуаций. Магнитное облако — это солнечная плазма с замороженным магнитным полем, силовые линии которого имеют вид расширяющейся петли, концы которой предположительно соединены с поверхностью Солнца.

В тот же период времени в интенсивности ГКЛ на станции КЛ Апатиты было зарегистрировано два форбуш-понижения (панель д). Начало первого

в ~23:00 UT 6 сентября 2017 г. также было обусловлено приходом МУВ1, причем оно практически совпало с SSC — при этом понижение интенсивности КЛ составило ~2.0 %. Второй форбуш-эффект с существенно большей амплитудой ~7.5 % начался в ~22:00 UT 7 сентября (панель д). Он также был обусловлен приходом КВМ, который сопровождался МУВ2 и МО. Это понижение КЛ имело сложную многоступенчатую структуру, причем вторая ступень была связана с прохождением МО через орбиту Земли 8 сентября 2017 г. (панели а–д). Отметим также, что резкое возрастание интенсивности КЛ во второй половине дня 10 сентября — это наземное возрастание СКЛ, известное как GLE72 (панель д) [Mishev et al., 2018; Кравцова, Сдобнов, 2021].

Вернемся к изучению свойств МГД-волн перед фронтами МУВ1 и МУВ2. На рис. 2, а, б в плоскости XY в системе координат GSE схематически показано взаимное расположение КА DSCOVR и WIND относительно Земли 6 и 7 сентября 2017 г. соответственно. По осям отложены расстояния R_E в радиусах Земли. Показаны также среднее направление проекции вектора ММП на плоскость XY (синяя линия) и нормали n_{sh} к фронту МУВ (красная стрелка), а также приведена информация о среднем угле между ними Θ_{Bnsh} [https://lweb.cfa.harvard.edu/shocks]. Первая волна (МУВ1) на КА DSCOVR была зарегистрирована в 23:07 UT 6 сентября. Она характеризовалась как квазиперпендикулярная МУВ со средним углом $\Theta_{Bnsh}=84.9^\circ$ (а). Вторая, тоже квазиперпендикулярная волна (МУВ2) ($\Theta_{Bnsh}=65.1^\circ$) была зарегистрирована

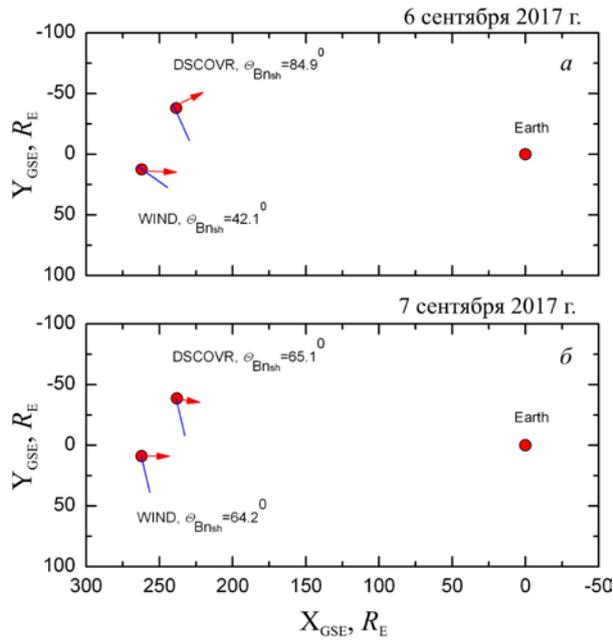


Рис. 2. Взаимное расположение Земли, а также КА DSCOVR и WIND в плоскости XY (система координат GSE) 6 (а) и 7 (б) сентября 2017 г. Синими отрезками показаны направления среднего ММП перед фронтами МУВ, красными стрелками — нормали к фронту МУВ. Отмечены названия КА и соответствующие углы Θ_{Bnsh}

в 22:28 UT 7 сентября (б). На КА WIND эти МУВ тоже были зарегистрированы: МУВ1 в 23:02 UT 6 сентября, причем она была квазипараллельной с $\Theta_{Bnsh}=42.1^\circ$ (а), а МУВ2, пришедшая тоже в 22:28 UT 7 сентября была уже квазиперпендикулярной с $\Theta_{Bnsh}=64.2^\circ$ (б). Обращает на себя внимание то, что на двух КА, сравнительно близко расположенных относительно друг друга ($\sim 50R_E$ по оси Y и $\sim 25R_E$ по оси X), 7 сентября была зарегистрирована квазиперпендикулярная МУВ2, тогда как 6 сентября на DSCOVR — квазиперпендикулярная, а на WIND — квазипараллельная МУВ1.

При анализе взаимного расположения КА и свойств МУВ за 2000–2014 гг. нами установлены 35 подобных случаев. Мы считаем, что это может быть вызвано либо скрученностью силовых линий ММП подобно канату, либо волнистостью структуры самого фронта МУВ. О скрученных (типа спагетти) магнитных структурах СВ упоминается в работе [Borovsky, 2020]: «Изучение статистики пространственного распределения положений токовых слоев и их ориентаций дает магнитную спагетти-структуру СВ; трубки магнитного потока извиваются вдоль спирали Паркера». А под термином волнистость мы подразумеваем то, что в отличие от большинства моделей МУВ, рассматривающих различные происходящие в СВ физические процессы в приближении плоского фронта, на самом деле сам фронт может иметь не плоскую, а волнистую поверхность.

В ряде работ проводилось изучение уровня турбулентности ММП в зависимости от свойств МУВ. Например, в [Pitna et al., 2016] на основании изучения 34 преимущественно квазиперпендикулярных МУВ было показано, что уровень флуктуаций за фронтами МУВ увеличивается почти на порядок по сравнению

с их уровнем до фронтов МУВ, но авторы не уточняли тип МГД-турбулентности. С другой стороны, в [Luttrel, Richter, 1987] авторами были обнаружены АВ в области перед квазипараллельными сверхкритическими МУВ и после них, БМЗ-волны были идентифицированы ими выше по потоку от квазипараллельных сверхкритических МУВ. В [Barkhatov et al., 2001] было показано, что наблюдается низкий уровень турбулентности СВ, когда направление среднего ММП перпендикулярно нормали к фронту МУВ и уровень турбулентности повышается при прохождении квазипродольных МУВ.

Чтобы установить, как ведет себя турбулентность СВ и какие типы МГД-волн наблюдаются в области перед фронтами МУВ в изучаемом нами случае, мы рассчитали спектральные характеристики модуля ММП, в котором содержится вся информация, заключенная в его компонентах, для двух интервалов времени (1 и 2) перед фронтами МУВ. Они отмечены соответствующими прямоугольниками 1 и 2 на рис. 3, где показаны B , n , U СВ, зарегистрированные на КА DSCOVR (а–в) и WIND (г–е). Спектры мощности флуктуаций B для этих двух интервалов для каждого КА показаны на рис. 4, а, б. Видно, что мощность флуктуаций модуля ММП P_B перед фронтом МУВ2 (сплошные кривые) существенно больше, чем соответствующие величины перед фронтом МУВ1 (штриховые кривые). Это вполне согласуется с выводами работы [Стародубцев, Шадрина, 1998], где показано, что сгенерированная перед МУВ турбулентность СВ сносится за фронт и перераспределяется за ним. В данном случае это означает, что повышенный уровень турбулентности перед МУВ2 служит фоном, на котором затем происходит дополнительная ее генерация.

Об уровне турбулентности МГД-волн определенного типа можно судить по коэффициентам когерентности между модулем ММП и скоростью СВ Γ_{BV} , модулем ММП и плотностью Γ_{Bn} , скоростью и плотностью СВ Γ_{Un} [Стародубцев и др., 2023 и ссылки в ней]. Они определяют вклад МГД-волн определенного типа в наблюдаемые спектры турбулентности модуля ММП, в котором содержится информация обо всех типах волн, колебаниях и разрывах всегда присутствующих в плазме СВ.

Соответствующие результаты расчетов, основанные на данных DSCOVR и WIND показаны на рис. 5, а–е и б, а–е соответственно. Они показывают, что в рассматриваемые интервалы времени в наблюдаемом спектре турбулентности преобладает вклад ММЗ-волн, о чем свидетельствуют значения коэффициентов когерентности (см. рис. 5, а–в и б, а–в). В области предфронта МУВ1 на DSCOVR (рис. 5, в) вклад ММЗ-волн в наблюдаемый спектр мощности модуля ММП в зависимости от частоты изменяется от 70 до $\sim 90\%$, а для области перед фронтом МУВ2 — от 40 до $>80\%$. На WIND (рис. 6, в) для первого интервала времени их количество изменяется от 40 до $\sim 90\%$, для второго по всем частотам их вклад составляет $\sim 100\%$. Такое значительное преобладание вклада ММЗ-волн над остальными в наблюдаемых спектрах мощности ММП оказалось для нас большой

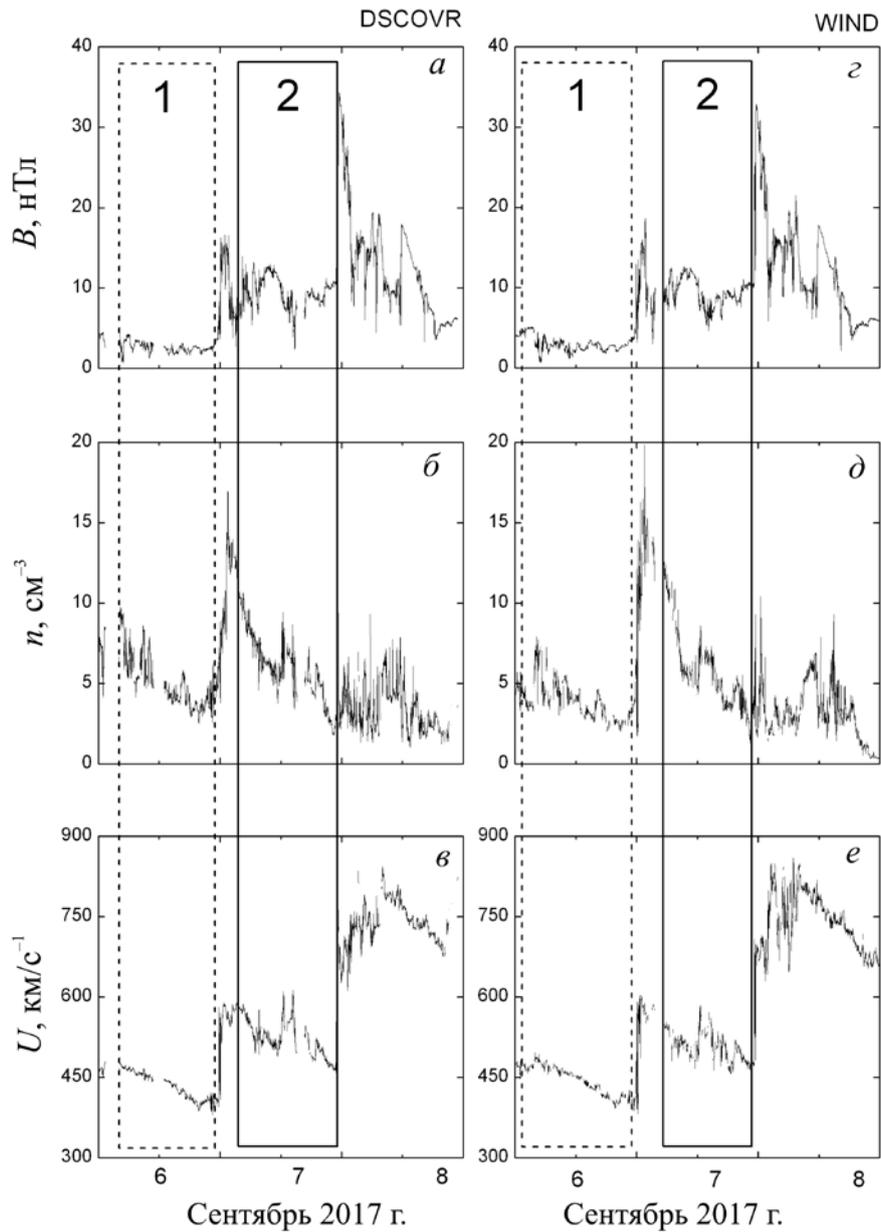


Рис. 3. Модуль ММП B , плотность n и скорость U плазмы СВ как функция времени по измерениям на КА DSCOVR (а-в) и WIND (z-е) 6–8 сентября 2017 г. Штриховые и сплошные прямоугольники — интервалы времени 1 и 2

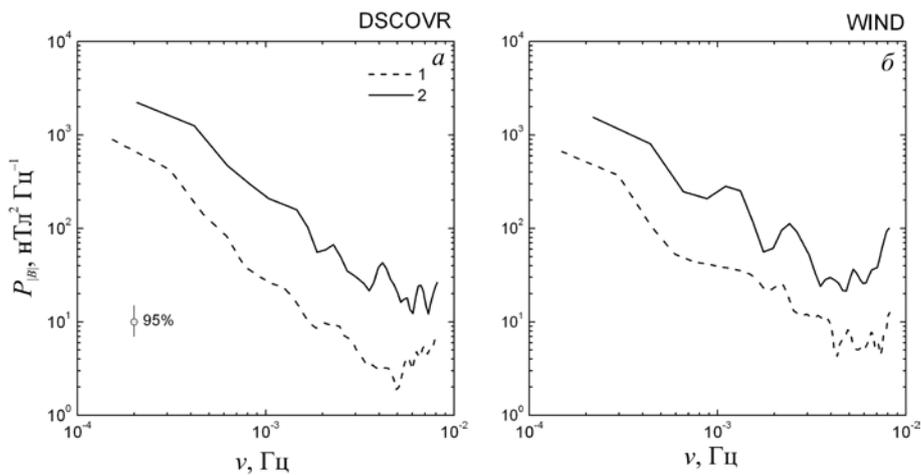


Рис. 4. Спектры мощности флуктуаций модуля ММП в зависимости от частоты по данным КА DSCOVR (а) и WIND (б) для рассматриваемых интервалов времени 1 и 2. Указан 95 % доверительный интервал

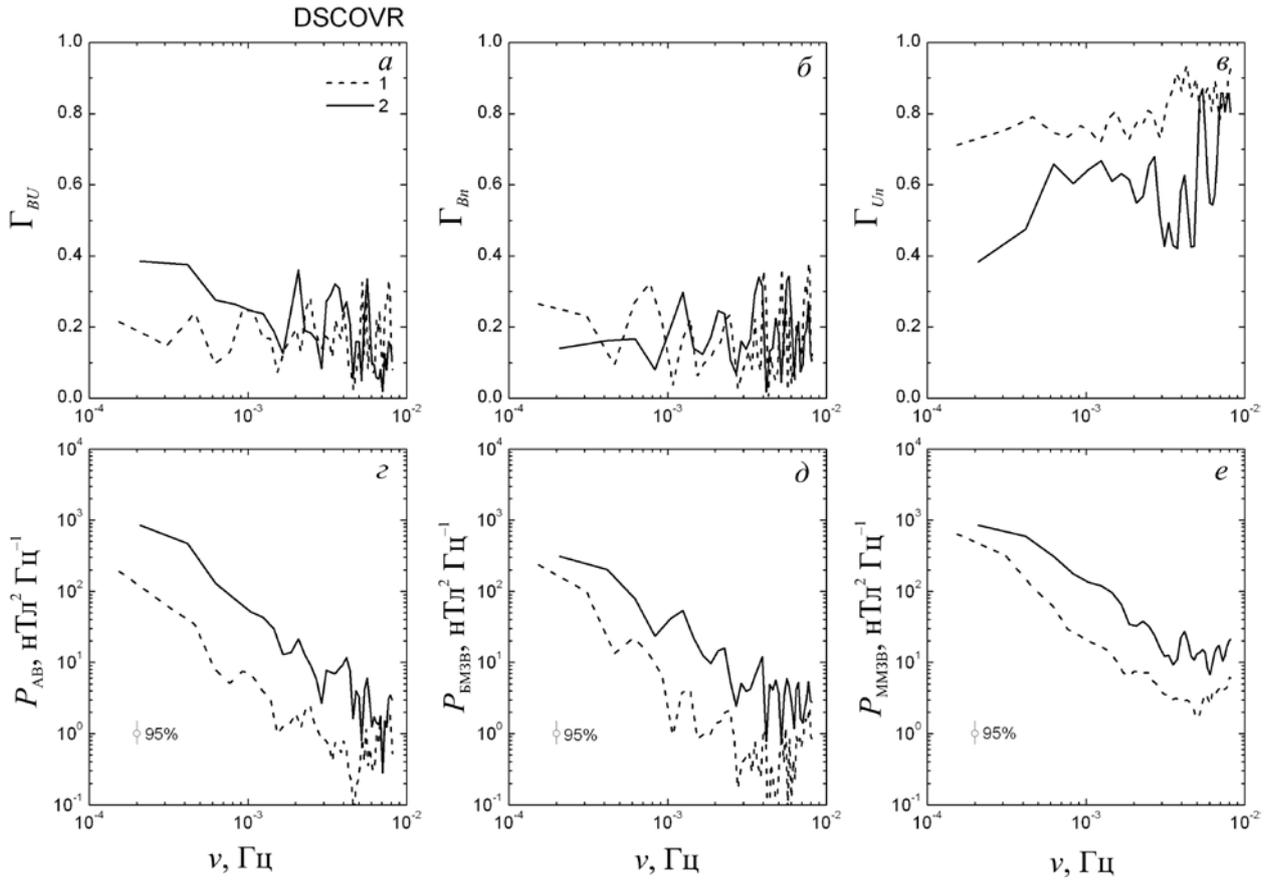


Рис. 5. Коэффициенты когерентности Γ между величинами B и U , B и n , а также между U и n (а-в) в зависимости от частоты, а также соответствующие спектры мощности АВ, БМЗ- и ММЗ-волн (г-е) по измерениям на DSCOVR для интервалов времени 1 и 2. Указаны 95-% доверительные интервалы

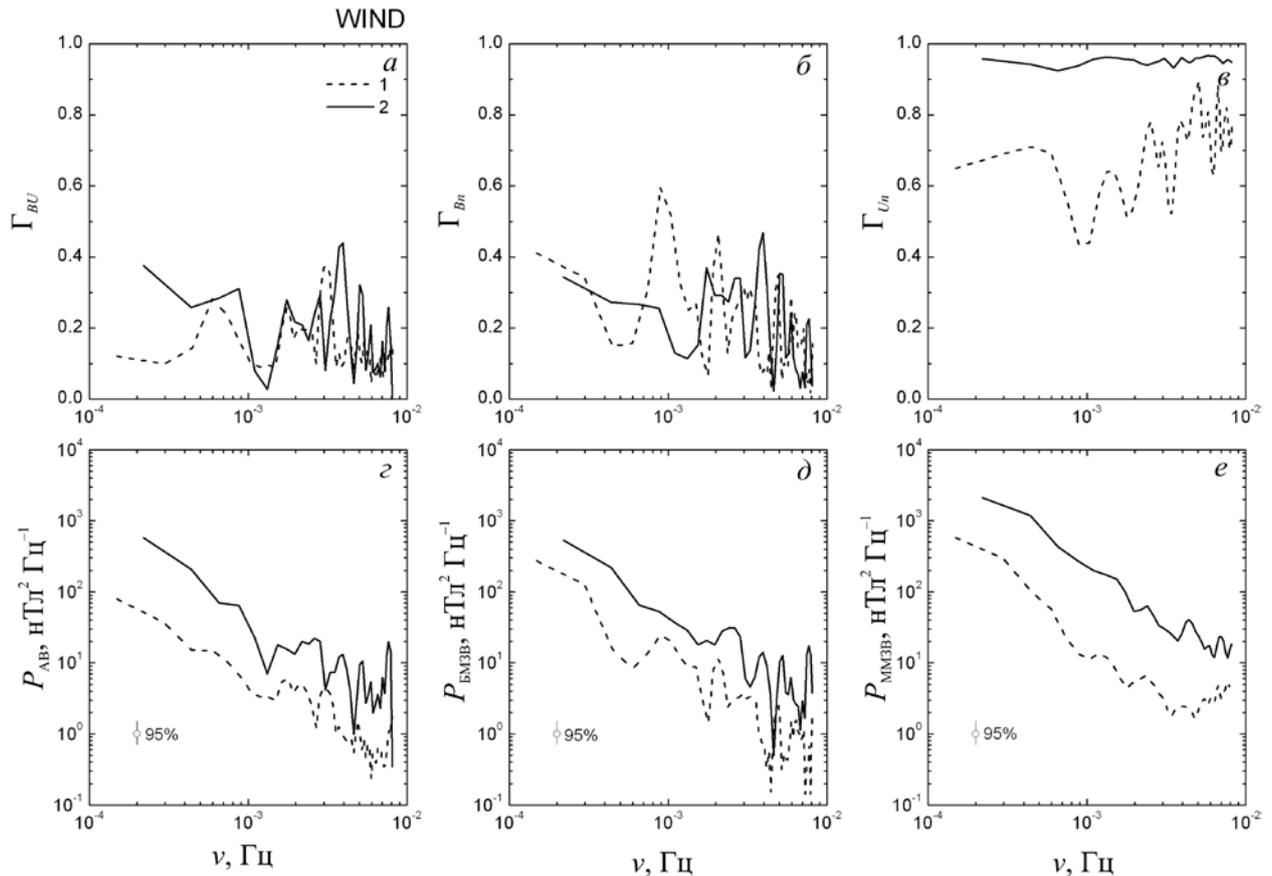


Рис. 6. То же для измерений на WIND

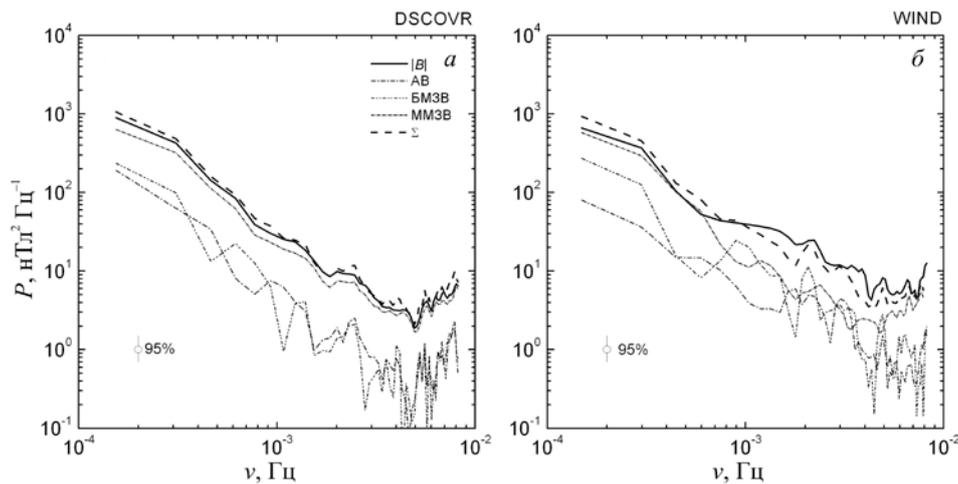


Рис. 7. Спектры мощности $|B|$, АВ, БМЗ- и ММЗ-волн, а также их сумма Σ по измерениям на DSCOVR (а) и WIND (б) для интервала времени 1. Указаны 95-% доверительные интервалы.

неожиданностью. Причина этого остается неизвестной, и для ее установления требуются дальнейшие детальные исследования на большом статистическом материале. Но в настоящее время ясно одно: поскольку в отличие от АВ МЗ-волны характеризуются большими декрементами затухания и не могут распространяться на большие расстояния, БМЗ- и ММЗ-волны должны генерироваться локально в СВ в направлении к Солнцу недалеко от орбиты Земли на расстоянии до 0.2–0.3 а.е. от места их наблюдения.

С другой стороны, коэффициенты когерентности, характеризующие АВ и БМЗ-волны, в обоих случаях (см. рис. 5, а, б и 6, а, б) довольно низкие и не превышают на отдельных частотах 40–50 %. Только в области 1 перед фронтом МУВ1 по измерениям WIND на частоте 10^{-3} Гц значение Γ_{Bn} достигает 60 %, что может быть вызвано присутствием штормовых частиц в этой области пространства.

Если теперь домножить наблюдаемые спектры мощности флуктуаций $|B|$ во временных интервалах 1 и 2 (см. рис. 3) на соответствующие им коэффициенты когерентности (см. рис. 5, а–в и 6, а–в), нетрудно рассчитать спектры мощности флуктуаций всех трех веток МГД-волн, которые регистрируются в околоземном космическом пространстве на обоих КА [Бережко, Стародубцев, 1988]. Соответствующие спектры мощности для МГД-волн каждого типа показаны на рис. 5, г–е и 6, г–е. Но, если сложить их вместе, в идеале мы должны получить спектр мощности $|B|$. Это показано на рис. 7, а, б. Для интервала 1 приведены спектры МГД-волн каждого установленного нами типа, их сумма и наблюдаемый спектр мощности флуктуаций $|B|$. Видно, что сумма Σ спектров МГД-волн трех типов (АВ, БМЗВ и ММЗВ) в пределах 95-% доверительного интервала хорошо совпадает с наблюдаемыми спектрами $|B|$. Это доказывает корректность применяемой нами методики для установления спектров МГД-волн определенного типа на основе анализа данных регистрации параметров межпланетной среды на КА. Небольшие расхождения между суммарными спектрами МГД-волн и наблюдаемыми спектрами мощности $|B|$ мы относим за счет вмороженных в плазму СВ колебаний

и разрывов, которые всегда присутствуют в межпланетной среде и переносятся вместе с СВ от их источника до точки наблюдения.

Заметим, что визуально отличить колебания от волн в данных наблюдений практически невозможно. В отличие от волн колебания являются статическими структурами, вмороженными в СВ и переносимыми вместе с ним в пространстве, тогда как волны имеют свою собственную скорость относительно СВ и могут распространяться в нем как вверх, так и вниз по потоку. Другими словами, МГД-волны в отличие от колебаний характеризуются наличием волнового вектора, параметры которого можно определить, например, с помощью применения методов направляющих косинусов и спектрального анализа к данным прямых измерений компонент ММП [Стародубцев и др., 2023].

ВЫВОДЫ

Таким образом, на основе проведенного анализа можно сделать следующие выводы.

1. Установлен вклад трех веток МГД-волн (АВ, БМЗ- и ММЗ-волн) в наблюдаемый спектр мощности модуля ММП в области префронтов МУВ, зарегистрированных DSCOVR и WIND, находящихся 6 и 7 сентября 2017 г. вблизи точки либрации L1.
2. В изучаемых событиях в области префронтов МУВ обнаружен преобладающий вклад ММЗ-волн в наблюдаемые спектры мощности $|B|$. Причина этого остается неизвестной. С учетом декремента затухания МГД-волн разных типов ясно, что ММЗ-волны должны генерироваться в СВ локально, недалеко от орбиты Земли. Мы допускаем, что в этом, возможно, определенную роль играют энтропийные волны.
3. Возможно, что наблюдение разноориентированных углов между нормальными к фронту и направлением среднего вектора ММП в одном и том же событии регистрации прохождения МУВ на достаточно близко расположенных относительно друг друга КА может служить свидетельством волнистой структуры фронтов МУВ, либо спагетти-структуры ММП.

Авторы благодарят команды космических аппаратов DSCOVR и WIND, Space Weather Prediction Center of the National Oceanic and Atmospheric Administration и NASA/Goddard Space Flight Center, а также станции КЛ Апатиты за свободный доступ к данным измерений параметров межпланетной среды и космических лучей.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ для ИКФИА СО РАН (FWRS-2021-0012) и государственного задания АН РС (Я) (приказ Минобрнауки РС(Я) № 01-03/32 от 01.01.2023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бережко Е.Г., Стародубцев С.А. Природа динамики спектра флуктуаций космических лучей. *Известия АН СССР. Сер. физическая*. 1988. Т. 53. С. 2361–2363.
- Дэспирак И.В., Клейменова Н.Г., Громова Л.И. и др. Суперсуббури во время бурь 7–8 сентября 2017 г. *Геомагнетизм и аэронаука*. 2020. Т. 60, № 3. С. 308–317. DOI: [10.31857/S0016794020030049](https://doi.org/10.31857/S0016794020030049).
- Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. Наземное возрастание интенсивности космических лучей на фазе спада 24 солнечного цикла: спектры и анизотропия. *Известия РАН. Сер. физическая*. 2021. Т. 85. С. 1194–1197. DOI: [10.31857/S0367676521080147](https://doi.org/10.31857/S0367676521080147).
- Максимов Д.С., Когогин Д.А., Насыров И.А., Загретдинов Р.В. Влияние солнечных вспышек 5–12 сентября 2017 г. на региональную возмущенность ионосферы Земли по данным ГНСС-станций, расположенных в Приволжском Федеральном округе РФ. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 2. С. 52–59. DOI: [10.12737/szf-92202306](https://doi.org/10.12737/szf-92202306).
- Рязанцева М.О., Рахманова Л.С., Ермолаев Ю.И. и др. Характеристики турбулентного потока солнечного ветра в областях компрессионной плазмы. *Косм. иссл.* 2020. Т. 58, № 6. С. 503–512. DOI: [10.31857/S0023420620060096](https://doi.org/10.31857/S0023420620060096).
- Сафаргалеев В.В., Терещенко П.Е. Пульсации герцового диапазона на фазе восстановления магнитной бури 7–8.09.2017 г. и связь их динамики с изменениями параметров межпланетной среды. *Геомагнетизм и аэронаука*. 2019. Т. 59, № 3. С. 301–315.
- Стародубцев С.А., Шадрина Л.П. Распределение МГД-турбулентности в окрестности переднего фронта крупномасштабных возмущений солнечного ветра. *Геомагнетизм и аэронаука*. 1998. Т. 38. С. 9–15.
- Стародубцев С.А., Григорьев А.В., Григорьев В.Г. и др. Флуктуации космических лучей и ММП в окрестности фронтов межпланетных ударных волн. *Известия РАН. Сер. физическая*. 2007. Т. 71. С. 1022–1024.
- 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. С. 78–85. DOI: [10.12737/szf-92202309](https://doi.org/10.12737/szf-92202309).
- Струминский А.Б., Григорьева И.Ю., Логачев Ю.И., Садовский А.М. Солнечные электроны и протоны в событиях 4–7 сентября 2017 г. и сопутствующие явления. *Физика плазмы*. 2020. Т. 46, № 2. С. 139–153.
- Топтыгин И.Н. *Космические лучи в межпланетных магнитных полях*. М.: Наука, 1983. 304 с.
- Яхнин А.Г., Яхнина Т.А. Особенности динамики электронов внешнего радиационного пояса с энергией 1 МэВ во время геомагнитных бурь 7–8 сентября 2017 года. *Известия РАН. Сер. физическая*. 2022. Т. 86, № 3. С. 349–354. DOI: [10.31857/S0367676522030279](https://doi.org/10.31857/S0367676522030279).
- Barkhatov N.A., Belliustin N.S., Bougeret J.-L., et al. Influence of the solar-wind magnetic field on the magnetosheath turbulence behind the bow shock. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2001. Vol. 44, no. 12. P. 915–923.
- Borovsky J.E. What magnetospheric and ionospheric researchers should know about the solar wind. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2020. Vol. 204. 105271. DOI: [10.1016/j.jastp.2020.105271](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105271).
- Borovsky J.E. Further investigation of the effect of upstream solar-wind fluctuations on solar-wind/ magnetosphere coupling: Is the effect real? *Front. Astron. Space Sci.* 2023. Vol. 9. 17 p. DOI: [10.3389/fspas.2022.975135](https://doi.org/10.3389/fspas.2022.975135).
- Borovsky J.E., Funsten H.O. Role of solar wind turbulence in the coupling of the solar wind to the Earth's magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108. P. 1246. DOI: [10.1029/2002JA009601](https://doi.org/10.1029/2002JA009601).
- Bruno A., Christian E.R., de Nolfo G.A. Spectral analysis of the September 2017 solar energetic particle events. *Space Weather*. 2019. Vol. 17. P. 419–437. DOI: [10.1029/2018SW002085](https://doi.org/10.1029/2018SW002085).
- Clilver M.A., Rodger C.J., Brundell J.B., et al. Long-lasting geomagnetically induced currents and harmonic distortion observed in New Zealand during the 7–8 September 2017 disturbed period. *Space Weather*. 2018. Vol. 16. P. 704–717. DOI: [10.1029/2018SW001822](https://doi.org/10.1029/2018SW001822).
- D'Amicis R., Perrone D., Vell M., et al. Investigating Alfvénic turbulence in fast and slow solar wind streams. *Universe*. 2022. Vol. 8. P. 352. DOI: [10.3390/universe8070352](https://doi.org/10.3390/universe8070352).
- Desai M., Dayeh M., Ebert R., et al. Ion acceleration at CME-driven shocks near the Earth and the Sun. *Proc. IP Conf.* 2012. Vol. 1500, iss. 1. P. 80–85. DOI: [10.1063/1.4768748](https://doi.org/10.1063/1.4768748).
- Despirak I.V., Setsko P.V., Sakharov Ya.A., et al. Geomagnetically induced currents during supersubstorms on September 7–8, 2017. *Bull. Russian Academy of Sciences: Physics*. 2023. Vol. 87, no. 7. P. 999–1006. DOI: [10.3103/S1062873823702283](https://doi.org/10.3103/S1062873823702283).
- Gololobov P., Starodubtsev S., Grigoryev V., Zverev A. NMDB and space weather forecasting. *Cosmic Ray Studies With Neutron Detectors*. 2023. Vol. 2. P. 69–80. DOI: [10.38072/2748-3150/p32](https://doi.org/10.38072/2748-3150/p32).
- Grigoryev A.V., Starodubtsev S.A., Grigoryev V.G., et al. Fluctuations of cosmic rays and IMF in the vicinity of interplanetary shocks. *Adv. Space Res.* 2008. Vol. 41. P. 955–961. DOI: [10.1016/j.asr.2007.04.044](https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.04.044).
- Howard T. *Coronal Mass Ejections: An Introduction*. Astrophysics and Space Science Library. Springer Science+Business Media, LLC. 2011. Vol. 376. DOI: [10.1007/978-1-4419-8789-1](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8789-1).
- Jankovicova D., Voros Z., Simkanin J. The influence of solar wind turbulence on geomagnetic activity. *Nonlinear Processes Geophys.* 2008. Vol. 15. P. 53–59.
- Luttrell A.H. Power Spectra of Low Frequency MHD turbulence up- and downstream of interplanetary fast shocks within 1 AU. *Ann. Geophys.* 1986. Vol. 4. P. 439–446.
- Luttrell A.H. Evidence for slow mode MHD turbulence in the solar wind: post-shock observations at 0.31 AU. *J. Geophys. Res.* 1987. Vol. 92. P. 13653–13657.
- Luttrell A.H., Richter A.K. Study of MHD fluctuations upstream and downstream of quasiparallel interplanetary shocks. *J. Geophys. Res.* 1987. Vol. 92. P. 2243–2252.
- Mishev A., Usoskin I., Raukunen O., et al. First analysis of ground-level enhancement (GLE72) on 10 September 2017: Spectral and anisotropy characteristics. *Solar Phys.* 2018. 293:136. DOI: [10.1007/s11207-018-1354-x](https://doi.org/10.1007/s11207-018-1354-x).
- Mostafa N., Ghamry E., Ellithi A., et al. Multi-space observations of the storm sudden commencement (September 2017) and its effect on the geomagnetic field. *Adv. Space Res.* 2022. Vol. 70. P. 641–651. DOI: [10.1016/j.asr.2022.04.023](https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.04.023).
- Pitna A., Safrankova J., Nemcek Z., et al. Density fluctuations upstream and downstream of interplanetary shocks. *Astrophys. J.* 2016. Vol. 819. P. 41–50. DOI: [10.3847/0004-637X/819/1/41](https://doi.org/10.3847/0004-637X/819/1/41).
- Rezeau L., Belmont G. Magnetic turbulence at the magnetopause, a key problem for understanding the solar wind/magnetosphere exchanges. *Space Sci. Rev.* 2001. Vol. 95. P. 427–441.

URL: https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/index.html (дата обращения 21 января 2024 г.).

URL: <http://pgia.ru/cosmicray> (дата обращения 21 января 2024 г.).

URL: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ftpbrowser/wind_epact_step_flux_hr.html (дата обращения 21 января 2024 г.).

URL: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/sc_merge_min1.html (дата обращения 21 января 2024 г.).

URL: <https://lweb.cfa.harvard.edu/shocks> (дата обращения 21 января 2024 г.).

URL: <https://umbra.nascom.nasa.gov/SEP> (дата обращения 21 января 2024 г.).

URL: <https://www.spaceweather.com> (дата обращения 21 января 2024 г.).

Статья подготовлена по материалам Девятнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 5–9 февраля 2024 г., ИКИ РАН, Москва.

Как цитировать эту статью:

Стародубцев С.А., Шадрин Л.П. МГД-волны в области префронта 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).