

## МЕЖПЛАНЕТНЫЕ УДАРНЫЕ ВОЛНЫ И МГД-ТУРБУЛЕНТНОСТЬ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В МАРТЕ 2013 г.

**А.С. Зверев, С.А. Стародубцев, В.Г., Григорьев, П.Ю. Гололобов**

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия  
a\_zverev@mail.ru

## INTERPLANETARY SHOCK WAVES AND MHD-TURBULENCE OF THE SOLAR WIND IN MARCH 2013

**A.S. Zverev, S.A. Starodubtsev, V.G., Grigoryev, P.Yu. Gololobov**

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia  
a\_zverev@mail.ru

**Аннотация.** В работе изучаются МГД-волны в окрестности квазипараллельных межпланетных ударных волн, зарегистрированных на орбите Земли космическим аппаратом WIND в марте 2013 г. На основе анализа данных прямых измерений параметров межпланетной среды установлен вклад различных типов МГД-волн (альфвеновских, быстрых и медленных магнитозвуковых) в наблюдаемый спектр флуктуаций межпланетного магнитного поля на инерционном участке спектра турбулентности солнечного ветра. Получено их распределение в окрестности этих ударных волн.

**Ключевые слова:** солнечный ветер, межпланетная ударная волна, МГД-волны.

**Abstract.** In this paper, we study MHD waves in the vicinity of quasi-parallel interplanetary shock waves recorded in the Earth's orbit by the WIND spacecraft in March 2013. Based on the analysis of data from direct measurements of the parameters of the interplanetary medium, the contribution of various types of MHD waves (Alfven, fast and slow magnetosonic) to the observed spectrum of interplanetary magnetic field fluctuations in the inertial region of the solar wind turbulence spectrum. Their distribution in the vicinity of these shock waves is obtained.

**Keywords:** solar wind, interplanetary shock, MHD-waves.

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение МГД-турбулентности солнечного ветра (СВ), главным образом возмущений межпланетного магнитного поля (ММП) с характерным масштабом менее 1 а.е., составляет одну из важнейших задач солнечно-земной физики, поскольку их наличие во многом определяет протекание различных физических процессов в межпланетной среде и в магнитосферах планет. Многочисленные измерения ММП на орбите Земли указывают на существование протяженного частотного спектра их флуктуаций [Russell, 1972; Коваленко, 1983]. Причем, в зависимости от уровня возмущенности Солнца, спектры флуктуаций ММП подвержены значительным временным изменениям. Поскольку вместе с магнитным полем изменяются и другие компоненты среды, которые и определяют ее состояние, то возникает необходимость изучения соответствующих изменений МГД-турбулентности СВ. При этом давно известно, что весь наблюдаемый спектр условно можно разбить на три участка (энергетический, инерционный и диссипативный), свойства волн и колебаний в которых различны. Причины, приводящие к этому, могут быть различны. Поэтому весьма важным является изучение разных типов МГД-волн при разных условиях в СВ. Эта задача весьма нетривиальна, поскольку требует знания многих компонентов среды, которые не всегда доступны и известны.

В данной работе на примере двух событий прохождения через орбиту Земли двух квазипараллельных межпланетных ударных волн (МУВ) в марте 2013 г. авторы изучают свойства определенных типов МГД-волн.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОД

В работе используются данные прямых измерений параметров СВ на различных космических аппаратах (КА), представленные разными командами исследователей на сайтах с открытым доступом. Мы использовали 1-мин и 1-час данные измерений параметров ММП и плазмы СВ на КА ACE и WIND [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>], а также 1-час данные измерений потоков энергичных частиц на КА ACE [<https://izwl.caltech.edu/ACE/ASC/index.html>]. Мы также использовали информацию о свойствах МУВ [<https://lweb.cfa.harvard.edu/shocks>; <http://ipshocks.fi/database>].

Свойства МГД-волн на инерционном участке спектра турбулентности СВ ( $\sim 10^{-4} \div 10^{-1}$  Гц) мы изучали на основе 1-мин данных и методов спектрального анализа. Для этого мы применяли метод Блэкмена—Тьюки с корреляционным окном Тьюки [Отнес, Эноксон, 1982]. Длина реализации исходных данных при расчетах спектральных характеристик составляла 1 сут, число степеней свободы 67, т. е. величина доверительных интервалов была достаточно мала. Отметим, что для идентификации МГД-волн важную роль играет так называемый коэффициент когерентности, который определяется как положительное значение из квадратного корня от функции когерентности и является аналогом функции корреляции, но не во временной, а в частотной области. Его использование позволяет определить вклад одного из типов МГД-волн (альфвеновских, быстрых или медленных магнитозвуковых) в наблюдаемый спектр ММП. Это следует из того известного факта,

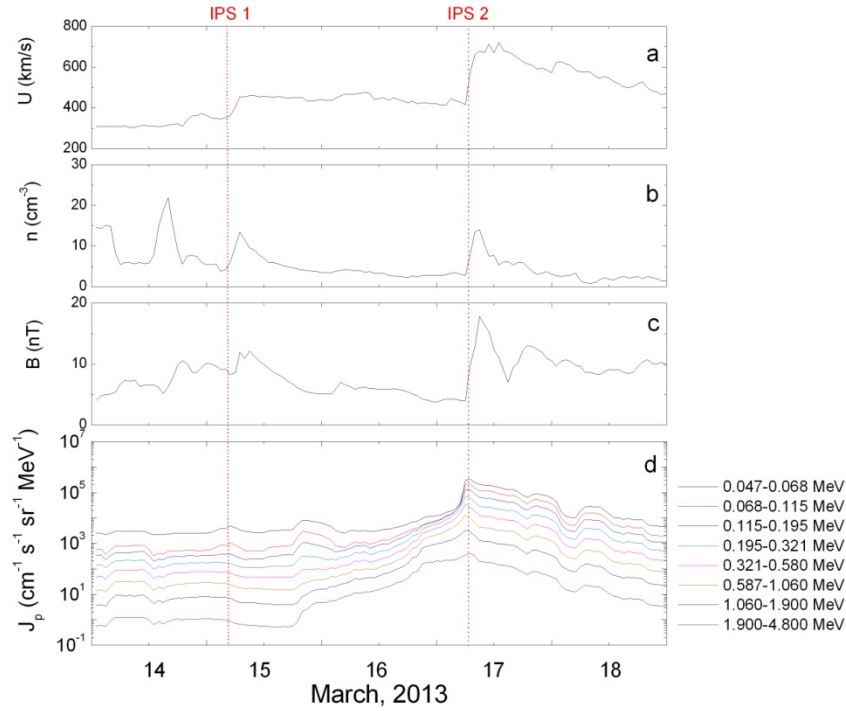


Рис. 1. Скорость (a), концентрация (b), модуль ММП (c) и потоки протонов (d) в зависимости от времени по измерениям на КА ACE для периода 14–18 марта 2013 г. Штриховыми линиями отмечены времена регистрации квазипараллельных МУВ на КА WIND. Справа приведена легенда для восьми дифференциальных энергетических каналов в эксперименте ACE/EPAM

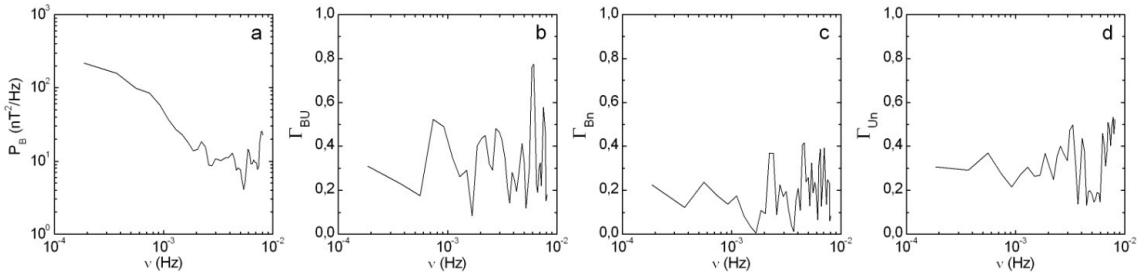


Рис. 2. Наблюдаемый спектр мощности модуля ММП (a), коэффициенты когерентности между  $B$  и  $U$  (b),  $B$  и  $n$  (c),  $U$  и  $n$  (d), характеризующие вклад МГД-волны определенного типа в спектр ММП

что альфвеновским волнам соответствует высокая корреляция между величиной ММП и скоростью СВ, быстрым магнитозвуковым — между величиной ММП и концентрацией плазмы СВ, а медленным магнитозвуковым — между скоростью и концентрацией плазмы СВ [Luttrell, Richter, 1986, 1987a, 1987b; Топтыгин, 1983].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены данные прямых измерений параметров СВ, а также потоков космических лучей низких энергий на КА ACE для периода времени 14–18 марта 2013 г. При этом 15 и 17 марта на орбите Земли были зарегистрированы две МУВ. В 04:33 UT 15 марта 2013 г. на КА WIND была зарегистрирована первая квазипараллельная МУВ с нормалью к фронту  $\mathbf{n}(-0.68; -0.26; -0.69)$  в системе координат GSE и с углом между средним направлением ММП и нормалью к фронту  $\theta_{Bn}=4^\circ$  [http://ipshocks.fi/database]. Вторая, также квазипараллельная МУВ была зарегистрирована этим же КА 17 марта в 05:21 UT, в этом случае компоненты нормали к фронту имели значе-

ния  $\mathbf{n}(-0.964; 0.028; 0.104)$ , а угол  $\theta_{Bn}=31.2^\circ$  [https://lweb.cfa.harvard.edu/shocks].

Для примера на рис. 2 приведены наблюдаемый спектр мощности модуля ММП (a), коэффициенты когерентности между величинами  $B$  и  $U$  (b),  $B$  и  $n$  (c),  $U$  и  $n$  (d). Первый из этих коэффициентов соответствует вкладу альфвеновских волн в наблюдаемый спектр флуктуаций ММП, второй — вкладу быстрых магнитозвуковых и третий — медленных магнитозвуковых. Для того чтобы установить спектр флуктуаций МГД-волны определенного типа достаточно наблюдаемые значения спектра модуля ММП домножить на соответствующий коэффициент когерентности, который изменяется от 0 до 1 [Бережко, Стародубцев, 1988]. Тогда их сумма соответствует наблюдаемому спектру ММП. При этом всегда есть небольшие отклонения (в пределах статистических неопределенностей), которые мы интерпретируем как присутствие в межпланетной среде статических колебаний, не имеющих собственной направленной скорости относительно окружающей среды, а переносимых в ней СВ.

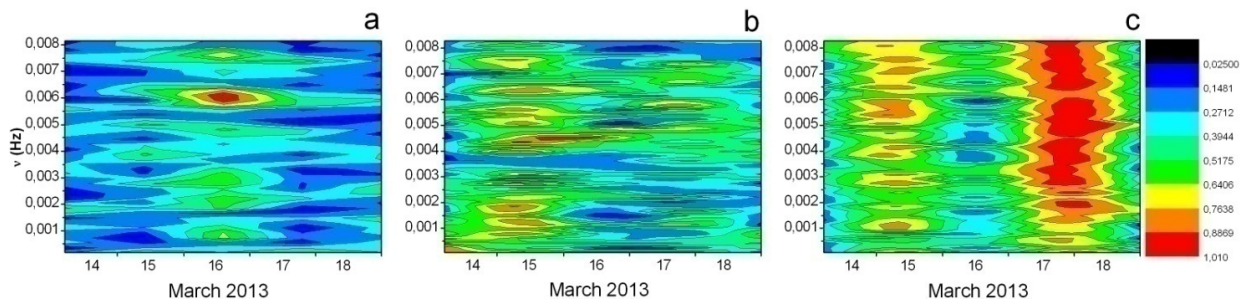


Рис. 3. Изменение во времени коэффициентов когерентности между  $B$  и  $U$  (a),  $B$  и  $n$  (b),  $U$  и  $n$  (c). По оси ординат отложена частота, по оси абсцисс — время. Справа показано изменение представленных величин

Для того чтобы наглядно представить динамику коэффициентов когерентности во времени, мы построили контурные карты (рис. 3). Из рисунка видно, что вклад альфеновских волн в наблюдаемый спектр мощности ММП максимален перед приходом 2-й МУВ, вклад быстрых магнитозвуковых — в окрестности фронта 1-й и перед фронтом 2-й МУВ, а вклад медленных магнитозвуковых — в окрестности фронта 1-й и за фронтом 2-й МУВ. Нужно отметить, что о медленных магнитозвуковых волнах в СВ известно мало, и необходимы дальнейшие исследования в этом направлении.

Необходимо принять во внимание, что генерация различных видов МГД-волн может происходить как в области взаимодействия разноскоростных потоков СВ [Kennel, Sagdeev, 1967; Стародубцев и др., 1996], так при наличии потоков КЛ с энергией порядка 1 МэВ солнечного и межпланетного происхождения, которые за счет больших градиентов и величин потоков заряженных частиц способны развить в СВ различные плазменные неустойчивости, конверсия которых и может привести к генерации МГД-волн [Бережко, 1986, 1990; Reames, 1989; Vainio, 2003; Танеев и др., 2018] (см. рис. 1).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. В спокойном СВ практически всегда присутствуют альфеновские волны, которые в силу малого декремента затухания могут от места генерации вблизи или на Солнце достигать орбиты Земли.

2. Регистрация быстрых и медленных магнитозвуковых волн связана с прохождением МУВ и других крупномасштабных возмущений СВ вблизи орбиты Земли, что обусловлено их большими декрементами затухания.

3. Для детального понимания условий генерации различного типа МГД-волн требуются дальнейшие исследования с привлечением данных прямых измерений параметров межпланетной среды на КА.

Работа поддержана грантом РФФИ № 22-22-20045. Авторы благодарят команды OMNI database, ACE и WIND за предоставленные данные.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бережко Е.Г. Неустойчивость в ударной волне, распространяющейся в газе с космическими лучами. *Письма*

в *Астрон. журн.* 1986. Т. 12. С. 842–847.

Бережко Е.Г. Генерация МГД-волн в межпланетной плазме потоками солнечных космических лучей. *Письма в Астрон. журн.* 1990. Т. 16. С. 1123–1132.

Бережко Е.Г., Стародубцев С.А. Природа динамики спектра флуктуаций космических лучей. *Изв. АН СССР. Сер. физ.* 1988. Т. 52. С. 2361–2363.

Коваленко В.А. *Солнечный ветер*. М.: Наука, 1983. 272 с.

Отнес Р., Эноксон Л. *Прикладной анализ временных рядов*. 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 аэронавигация*. 1996. Т. 36. С. 134–138.

Танеев С.Н., Стародубцев С.А., Бережко Е.Г. Ускорение частиц и генерация альфеновских волн на межпланетной ударной волне 4 апреля 2001 г. *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2018. Т. 153, № 5. С. 765–775.

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

Kennel C.F., Sagdeev R.Z. Collisionless shock waves in high  $\beta$  plasmas: 1. *J. Geophys. Res.* 1967. Vol. 72. P. 3303–3326.

Luttrel 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. P. 439–446.

Luttrel A.H., Richter A.K. Study of MHD fluctuations upstream and downstream of quasiparallel interplanetary shocks. *J. Geophys. Res.* 1987a. Vol. 92. P. 2243–2252.

Luttrel A.H., Richter A.K. Evidence for slow mode MHD turbulence in the solar wind: Post-shock observations at 0.31 au. *J. Geophys. Res.* 1987b. Vol. 92. P. 13653–13657.

Reames D.V. Wave generation in the transport of particles from large solar flares. *Astrophys. J. Lett.* 1989. Vol. 342. P. L51–L53.

Russell C.T. Comments on the measurement of power spectra of the inter-planetary magnetic field. *Solar Wind. NASA SP-308*. 1972. P. 365–374.

Vainio R. On the generation of Alfvén waves by solar energetic particles. *Astron. Astrophys.* 2003. Vol. 406. P. 735–740.

URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 30 мая 2022 г.).

URL: <https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/index.html> (дата обращения 30 мая 2022 г.).

URL: <https://lweb.cfa.harvard.edu/shocks> (дата обращения 30 мая 2022 г.).

URL: <http://ipshocks.fi/database> (дата обращения 30 мая 2022 г.).