

## ФОРБУШ-ЭФФЕКТЫ, СОЗДАННЫЕ ВЫБРОСАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕЩЕСТВА С МАГНИТНЫМИ ОБЛАКАМИ

М.А. Абунина, А.В. Белов, Н.С. Шлык, А.А. Абуни

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, Россия  
abunina@izmiran.ru

## FORBUSH EFFECTS CREATED BY CORONAL MASS EJECTIONS WITH MAGNETIC CLOUDS

M.A. Abunina, A.V. Belov, N.S. Shlyk, A.A. Abunin

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Troitsk, Moscow, Russia  
abunina@izmiran.ru

**Аннотация.** Изучается влияние магнитных облаков на вариации плотности космических лучей, регистрируемых нейтронными мониторами. Выделяются статистические закономерности и характерные особенности форбуш-эффектов, обусловленных межпланетными возмущениями с магнитными облаками (342 события). Обсуждается поведение основных параметров солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и космических лучей во время прохождения магнитных облаков мимо Земли. Установлено, что чаще всего максимальная скорость солнечного ветра внутри магнитного облака регистрируется в начале события, а максимальное значение межпланетного магнитного поля — как в начале, так и в середине.

**Ключевые слова:** космические лучи, форбуш-эффект, межпланетные возмущения, магнитные облака.

**Abstract.** We study the influence of magnetic clouds on cosmic ray density variations recorded by neutron monitors. The statistical patterns and characteristic features of such events are determined using data on 342 Forbush effects caused by interplanetary disturbances containing magnetic clouds. The behavior of the main parameters of solar wind, interplanetary magnetic field, and cosmic rays during the passage of magnetic clouds beside the Earth are discussed. The maximum solar wind velocity inside a magnetic cloud was found to be most often observed at the beginning, while the maximum value of the interplanetary magnetic field was recorded both at the beginning and in the middle of the event.

**Keywords:** cosmic rays, Forbush effect, interplanetary disturbances, magnetic clouds.

### ВВЕДЕНИЕ

Форбуш-эффекты (ФЭ) — это изменения плотности и анизотропии космических лучей (КЛ) в крупномасштабных возмущениях солнечного ветра (СВ). Существуют два основных типа возмущений: рекуррентные и спорадические. К первым относятся вращающиеся вместе с Солнцем высокоскоростные потоки плазмы из корональных дыр (например, работа [Richardson, 2018] и ссылки в ней); ко вторым — межпланетные корональные выбросы массы (МКВМ) ([Belov, 2009; Papaioannou et al., 2020] и ссылки в них). В МКВМ могут присутствовать магнитные облака (МО) — межпланетный выброс определенного типа, обладающий рядом характеристик, среди которых наиболее значимыми являются сильное межпланетное магнитное поле (ММП), плавное вращение его компонент на большие углы и пониженная температура. Также из-за большой величины ММП и низких протонных температур МО свойственны низкие значения плазменной бета ( $\beta < 1$ ) [Burlaga et al., 1981, 1982].

В данной работе приводятся только основные результаты, более подробное изложение можно найти в [Абунина и др., 2021].

### ДАнные И МЕТОды

Мы объединили несколько существующих списков магнитных облаков, взятых из работ [Lynch et al., 2003, 2005; Huttunen et al., 2005; Marubashi, Lepping, 2007; Gopalswamy et al., 2010; Richardson, Cane, 2010; Kim et al., 2013] и онлайн-каталогов [[https://wind.nasa.gov/mfi/mag\\_cloud\\_pub1.html](https://wind.nasa.gov/mfi/mag_cloud_pub1.html), [https://wind.nasa.gov/mfi/mag\\_cloud\\_S1.html](https://wind.nasa.gov/mfi/mag_cloud_S1.html),

[https://cdaw.gsfc.nasa.gov/meetings/2010\\_fluxrope/LW\\_S\\_CDAW2010\\_ICMEtbl.html](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/meetings/2010_fluxrope/LW_S_CDAW2010_ICMEtbl.html), <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>, <http://www.iki.rssi.ru/omni/catalog>], чтобы изучить некоторые статистические зависимости. Из указанных выше источников было получено 342 МО за 1995–2021 гг. Каждое из выделенных МО было частью МКВМ, в результате влияния которого был зарегистрирован ФЭ в данных НМ. Данные по ФЭ и всем сопутствующим параметрам СВ, ММП, КЛ и геомагнитной активности (ГА) были включены в базу данных форбуш-эффектов и межпланетных возмущений (FEID — Forbush Effects and Interplanetary Disturbances, [<http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html>]), созданную в ИЗМИРАН.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведем пример форбуш-эффекта, вызванного взаимодействием МКВМ с МО. На рис. 1 показано поведение основных параметров СВ, КЛ и ГА в период прохождения МО мимо Земли.

Видно, что основные особенности МО явно выражены во всех приведенных параметрах: общее ММП достаточно высокое ( $B_{\max} = 19.4$  нТл), вектор поля плавно вращается на большой угол (верхняя панель); скорость СВ плавно падает на протяжении всего МО; зарегистрированы низкие значения плазменной бета (вторая панель); температурный индекс также значительно ниже единицы, что согласно [Мелкумян и др., 2020] является явным признаком МО.

Рассмотрим соотношение величины вариаций КЛ внутри МО АМС и общей величины ФЭ  $A_F$  (рис. 2, а). Видно, что связь между амплитудой ФЭ и вариациями

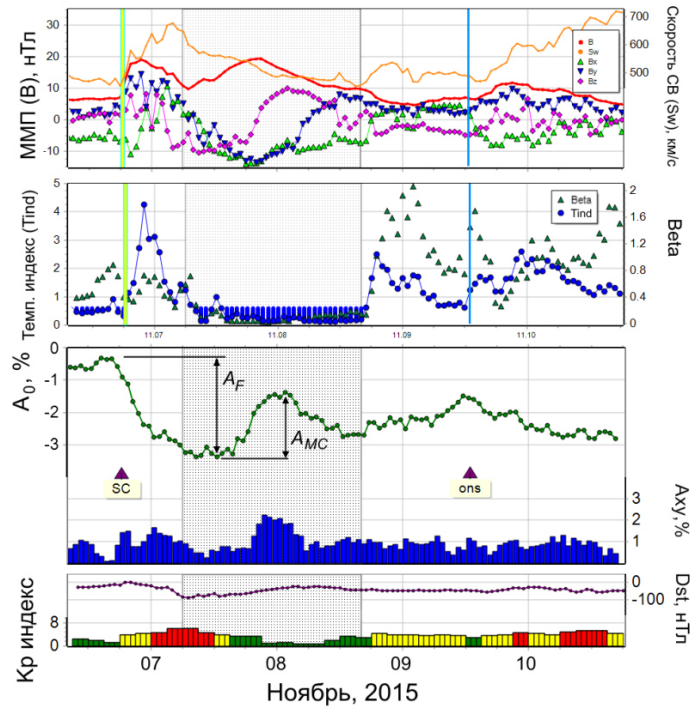


Рис. 1. Поведение основных параметров СВ, КЛ и ГА во время прохождения магнитного облака мимо Земли 7–8 ноября 2015 г. Верхняя панель — изменения скорости СВ, модуля и компонент ММП  $B$ ; вторая панель — плазменная бета и температурный индекс; третья панель — вариации плотности  $A_0$  и экваториальной составляющей векторной анизотропии КЛ  $A_{xy}$ ; нижняя панель — поведение геомагнитных индексов  $Dst$  и  $K_p$ . Толстой вертикальной прямой (SC) обозначено время регистрации SSC, тонкой прямой (ons) — начало следующего события в FEID, область с серой заливкой — время прохождения МО мимо Земли

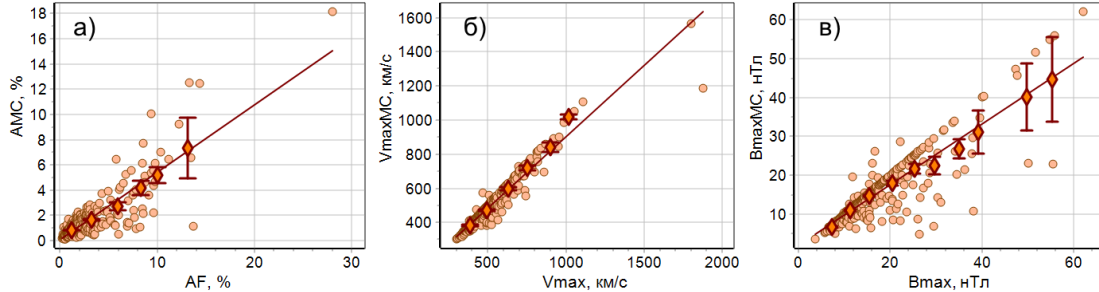


Рис. 2. Связи основных параметров ФЭ и МО:  $a$  — величины ФЭ  $A_F$  с величиной вариаций КЛ внутри МО  $A_{MC}$ ;  $b$  — максимальной скорости СВ;  $v$  — величины ММП во всем межпланетном возмущении и внутри МО

плотности КЛ внутри МО существует ( $r=0.85\pm 0.03$ ). Можно также заключить, что вклад МО в амплитуду ФЭ значителен в большинстве случаев — примерно 60 % вариаций КЛ регистрируются внутри МО.

На рис. 2,  $b$ ,  $v$  показаны соотношения максимальных значений скорости СВ ( $b$ ) и величины ММП ( $v$ ) во всем межпланетном возмущении и в самом МО. Видно, что связь между максимальными значениями скорости СВ и величины ММП внутри МО и во всем межпланетном возмущении очень тесная:  $r(V)=0.96\pm 0.02$ ,  $r(B)=0.86\pm 0.02$ . Это свидетельствует о том, что параметры МО являются основными и определяющими, т. е., если все межпланетное возмущение имеет высокую скорость, то и МО будет достаточно высокоскоростным.

Далее мы рассмотрели время регистрации максимальных значений основных параметров СВ и ММП внутри МО. Мы определили эти временные

параметры не в часах, а в процентах от продолжительности МО, поэтому можно сравнивать МО любой длительности. На рис. 3 показаны гистограммы распределения времени регистрации максимальных значений скорости СВ ( $a$ ) и модуля ММП ( $b$ ) внутри МО.

По распределению времени достижения максимальных значений параметров СВ можно определить, что чаще всего максимальная скорость СВ внутри МО регистрируется в его начале (для 220 МО в интервале времени 0–20 %), а в поведении максимального поля внутри МО наблюдается несколько другая картина. Явно выделяются две группы событий: в первой максимум ММП регистрируется в начале события (0–20 %, для 111 МО), во второй максимум ММП достигается в середине события (в интервале времени 30–60 % для 92 МО). Отметим, что возрастание  $V_{max}$  и  $B_{max}$  в конце МО (последние столбцы

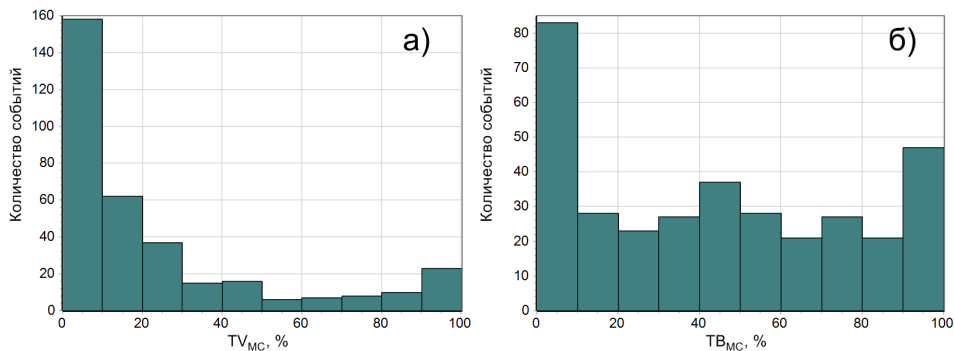


Рис. 3. Распределение времени регистрации максимальных значений скорости СВ (а) и модуля ММП (б) внутри МО

на рис. 3) связано с взаимодействием с последующим межпланетным возмущением.

### ВЫВОДЫ

Мы выделили и изучили межпланетные возмущения, содержащие магнитные облака, и связанные с ними форбуш-эффекты (342 события за 1995–2021 гг.). Полученные данные позволяют проводить статистические исследования и получать статистически значимые результаты. Один из главных результатов заключается в том, что МО создают большую часть ФЭ, т. е. подтверждают выводы других авторов, например, [Richardson, Cane, 2011], на значительно большем статистическом материале и с более точными исходными данными, чем в более ранних работах. Вариации КЛ внутри МО тесно связаны с максимальными параметрами СВ и ММП внутри МО.

Изученные нами МО весьма разнообразны. По распределению времени регистрации максимальных параметров СВ и ММП можно отметить, что чаще всего максимальная скорость СВ внутри МО регистрируется в начале события, а максимальное значение ММП — как в начале, так и в середине.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абунина М.А., Белов А.В., Шлык Н.С. и др. Форбуш-эффекты, созданные выбросами солнечного вещества с магнитными облаками. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2021. Т. 61, № 5. С. 572–582.

Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А. и др. Поведение скорости и температуры солнечного ветра в межпланетных возмущениях, создающих форбуш-понижения. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2020. Т. 60, № 5. С. 547–556.

Belov A.V. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena. *Proc. IAU Symposium*. 2009. Vol. 257. P. 439–450.

Burlaga L., Sittler E., Mariani F., Schwenn R. Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios, and IMP 8 observations. *J. Geophys. Res.* 1981. Vol. 86. P. 6673–6684.

Burlaga L.F., Behannon K.W. Magnetic clouds: Voyager observations between 2 and 4 AU. *Solar Phys.* 1982. Vol. 81. P. 181–192.

Gopalswamy N., Xie H., Mäkelä P., et al. Interplanetary shocks lacking type II radio bursts. *Astrophys. J.* 2010. Vol. 710. P. 1111–1126.

Huttunen K., Schwenn R., Bothmer V., Koskinen H. Properties and geoeffectiveness of magnetic clouds in the rising, maximum and early declining phases of solar cycle 23. *Ann. Geophys.* 2005. Vol. 23. P. 625–641.

Kim R.-S., Gopalswamy N., Cho K.-S., Moon Y.-J., Yashiro S. Propagation characteristics of CMEs associated with magnetic clouds and ejecta. *Solar Phys.* 2013. Vol. 284. P. 77–88.

Lynch B.J., Zurbuchen T.H., Fisk L.A. Internal structure of magnetic clouds: Plasma and composition. *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108, iss. A6. P. 1239.

Lynch B.J., Gruesbeck J.R., Zurbuchen T.H., Antiochos S.K. Solar cycle-dependent helicity transport by magnetic clouds. *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110. A08107.

Marubashi K., Lepping R. Long-duration magnetic clouds: a comparison of analyses using torus- and cylindershaped flux rope models. *Ann. Geophys.* 2007. Vol. 25, iss. 11. P. 2453–2477.

Papaioannou A., Belov A., Abunina M., et al. Interplanetary coronal mass ejections as the driver of non-recurrent Forbush decreases. *Astrophys. J.* 2020. Vol. 890. P. 101.

Richardson I.G., Cane H.V. Near-Earth interplanetary coronal mass ejections during solar cycle 23 (1996–2009): Catalog and summary of properties. *Solar Phys.* 2010. Vol. 264. P. 189–237.

Richardson I.G., Cane H.V. Galactic cosmic ray intensity response to interplanetary coronal mass ejections/magnetic clouds in 1995–2009. *Solar Phys.* 2011. Vol. 270. P. 609–627.

Richardson I.G. Solar wind stream interaction regions throughout the heliosphere. *Living Reviews in Solar Physics*. 2018. Vol. 15.

URL: [https://wind.nasa.gov/mfi/mag\\_cloud\\_pub1.html](https://wind.nasa.gov/mfi/mag_cloud_pub1.html) (дата обращения 19 мая 2022 г.).

URL: [https://wind.nasa.gov/mfi/mag\\_cloud\\_S1.html](https://wind.nasa.gov/mfi/mag_cloud_S1.html) (дата обращения 19 мая 2022 г.).

URL: [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/meetings/2010\\_fluxrope/LWS\\_CDA\\_W2010\\_ICMETbl.html](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/meetings/2010_fluxrope/LWS_CDA_W2010_ICMETbl.html) (дата обращения 19 мая 2022 г.).

URL: <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm> (дата обращения 19 мая 2022 г.).

URL: <http://www.iki.rssi.ru/omni/catalog> (дата обращения 19 мая 2022 г.).

URL: <http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html> (дата обращения 19 мая 2022 г.).