

УДК 524.1-352

ФОРБУШ-ЭФФЕКТЫ, СОЗДАННЫЕ ВЫБРОСАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕЩЕСТВА С МАГНИТНЫМИ ОБЛАКАМИ

© 2021 г. М. А. Абунина¹*, А. В. Белов¹, Н. С. Шлык¹, **Е. А. Ерошенко¹**,
А. А. Абунин¹, В. А. Оленева¹, И. И. Прямушкина¹, В. Г. Янке¹

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

*e-mail: abunina@izmiran.ru

Поступила в редакцию 26.02.2021 г.

После доработки 20.04.2021 г.

Принята к публикации 27.05.2021 г.

Изучается влияние магнитных облаков на вариации плотности космических лучей, регистрируемые нейтронными мониторами. Из данных о 252 Форбуш-эффектах, обусловленных межпланетными возмущениями, содержащими магнитные облака, выделяются статистические закономерности и характерные особенности таких событий. Обсуждается поведение основных параметров солнечного ветра, космических лучей и геомагнитной активности во время прохождения магнитных облаков мимо Земли, а также характерные особенности внутренней структуры магнитных облаков. Было показано, что вариации космических лучей тесно связаны с максимальными параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля внутри магнитных облаков. Установлено, что по распределению времени максимальных параметров солнечного ветра чаще всего максимальная скорость внутри магнитного облака регистрируется в начале, а максимальное значение межпланетного магнитного поля – как в начале, так и в середине события. Также получено, что существует достаточно тесная корреляция вариаций плотности космических лучей в магнитном облаке с его размером, выраженным в гирорадиусах.

DOI: 10.31857/S0016794021050023

1. ВВЕДЕНИЕ

Форбуш-эффекты (ФЭ) – это изменения плотности и анизотропии космических лучей (КЛ) в крупномасштабных возмущениях солнечного ветра. Впервые они были отмечены как эффекты понижения интенсивности космических лучей, совпадающие с геомагнитными бурями, в 1937 г. американским физиком Форбушем [Forbush, 1937, 1938] и названы его именем. Существуют два основных типа возмущений солнечного ветра, которые модулируют космические лучи, создавая ФЭ: рекуррентные и спорадические. К первым относятся вращающиеся вместе с Солнцем высокоскоростные потоки плазмы из корональных дыр, [например, Richardson, 2018 и ссылки там]; ко вторым – межпланетные корональные выбросы массы (ICMEs – *Interplanetary Coronal Mass Ejections*) [Cane, 2000; Belov, 2009; Dumbović et al., 2020; Papaioannou et al., 2020 и ссылки в них]. Форбуш-эффекты часто начинаются с прихода к Земле ударной волны, предшествующей ICME, и интенсивность галактических КЛ может дополнительно снижаться внутри выброса.

В ICME могут присутствовать магнитные облака (МО) – определенный тип межпланетного

выброса корональной массы, обладающий рядом характеристик, среди которых наиболее значимыми являются сильное магнитное поле, плавное вращение его компонент на большие углы и пониженная температура. Также из-за большой величины магнитного поля и низких протонных температур МО свойственны низкие значения плазменной бета ($\beta < 1$) [Burlaga et al., 1981, 1982; Klein and Burlaga, 1982; Gosling et al., 1990].

Проведенные ранее исследования МО показали, что в силу своих особенностей они оказывают значительное влияние на магнитное поле Земли, вызывая возмущения – магнитные бури разной величины [Zhang and Burlaga, 1988; Gosling et al., 1991; Gopalswamy et al., 2015]. На данный момент существуют несколько моделей, описывающих внутреннюю структуру магнитного поля в МО [Klein and Burlaga, 1982; Goldstein, 1983; Lepping et al., 1990], а также современные дополнения и уточнения, представленные в работах [Lynch et al., 2003; Lepping et al., 2020; Petukhova et al., 2020], выделены различные типы МО в зависимости от расположения его оси и границ [Bothmer and Schwenn, 1994, 1998; Mulligan et al., 1998]. Исследованы различные параметры МО, например,

стабильность, взаимодействия с солнечным ветром и особенности распространения в межпланетной среде, существование связи с солнечными циклами, влияние на геомагнитную обстановку на Земле и др. [Echer et al., 2005; Huttunen et al., 2005; Marubashi and Lepping, 2007; Ruffenach et al., 2015; Li et al., 2018].

Многие авторы также рассматривали вопрос о влиянии магнитных облаков на модуляцию космических лучей. Есть работы, в которых авторы отмечают, что роль МО в образовании ФЭ довольно незначительна [например, Lockwood et al., 1991], но если магнитному облаку предшествовала ударная волна, или оно было связано с выбросом типа гало, то эффект его влияния на модуляцию КЛ был замечен [например, Badruddin et al., 1986; Parnahaj and Kudela, 2015]. Другие исследователи отмечают, что межпланетные выбросы корональной массы, содержащие магнитные облака, значительно эффективнее модулируют космические лучи [Zhang and Burlaga, 1988; Burlaga, 1991; Richardson and Cane, 2011; Kumar and Badruddin, 2014; Белов и др., 2015; Masías-Meza et al., 2016].

Настоящая работа направлена на изучение влияния МО на вариации плотности космических лучей, регистрируемые наземными детекторами – сетью нейтронных мониторов (НМ) – и выделение статистических закономерностей, а также характерных особенностей МО на большом числе событий.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В данной работе мы объединили несколько существующих списков магнитных облаков, взятые из статей [Lynch et al., 2003; Huttunen et al., 2005; Marubashi, Lepping, 2007; Gopalswamy et al., 2010; Richardson, Cane, 2010a; Kim et al., 2013] и он-лайн каталогов (https://wind.nasa.gov/mfi/mag_cloud_pub1.html, https://wind.nasa.gov/mfi/mag_cloud_S1.html, https://cdaw.gsfc.nasa.gov/meetings/2010_fluxrope/LWS_CDAW2010_ICMEtbl.html, <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>), чтобы изучить некоторые статистические зависимости.

Из указанных выше источников было получено 252 МО за период с 1995 по 2019 г. Каждое из выделенных магнитных облаков было частью выброса корональной массы, в результате влияния которого был зарегистрирован ФЭ в данных НМ. Данные по ФЭ и всем сопутствующим параметрам солнечного ветра (скорость, плотность, температура, плазменная бета и др.), межпланетного магнитного поля (ММП), космических лучей и геомагнитной активности 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. Параметры солнечного ветра (СВ) и ММП взяты из базы данных OMNI (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>), список SSC из (<http://isgi.unistra.fr/datadownload.php>), данные корональных выбросов массы из (<https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CMElist/>). Данные по геомагнитной активности брались из (<ftp://ftp.gfz-potsdam.de/pub/home/obs/kp-ap/wdc/>) и (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/index.html>). Параметры КЛ (вариации плотности, составляющие векторной анизотропии) рассчитывались методом глобальной съемки (*GSM – Global Survey Method*, [Белов и др., 2018]) по данным мировой сети нейтронных мониторов (*NMDB – Neutron Monitor Data Base*, (<http://www01.nmdb.eu/>)) для частиц с жесткостью 10 ГВ. Список исследуемых Форбуш-эффектов с различными параметрами, в том числе рассчитанными для магнитных облаков, можно найти в (http://spaceweather.izmiran.ru/dbs/mc/list_mc_252.pdf).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Приведем пример Форбуш-эффекта, связанного с магнитным облаком. На рисунке 1 показано поведение основных параметров солнечного ветра, космических лучей и геомагнитной активности в период прохождения магнитного облака мимо Земли.

На верхней панели рис. 1 приведены изменения скорости солнечного ветра (правая шкала, верхняя светло-серая кривая), модуля и компонент межпланетного магнитного поля (левая шкала, темно-серая сплошная кривая – общее поле (B), ромбы – B_z -компонента, треугольники вверх – B_x , треугольники вниз – B_y -компонента); на второй панели приведены данные температуры (правая шкала, крестики) и плотности (левая шкала, кружки) СВ; на третьей панели – плазменная бета (правая шкала, треугольники вверх) и температурный индекс (левая шкала) [Мелкумян и др., 2020; Melkumyan et al., 2021]; на четвертой панели построены вариации плотности (левая шкала, верхняя кривая, A_0) и экваториальной составляющей векторной анизотропии КЛ (правая шкала, столбики); на нижней панели показано поведение геомагнитных индексов (Dst и Kp). Толстой вертикальной светло-серой прямой (SC) обозначено время регистрации SSC, закрашенная серая область – время прохождения магнитного облака, тонкой серой прямой (ons) указано начало следующего события в *FEID*.

На рисунке 1 показаны некоторые параметры, используемые в данной работе. На верхней панели стрелками указаны моменты регистрации максимальных значений скорости солнечного ветра в межпланетном возмущении (V_{max}) и внутри магнитного облака ($V_{max}MC$) и индукции ММП внут-

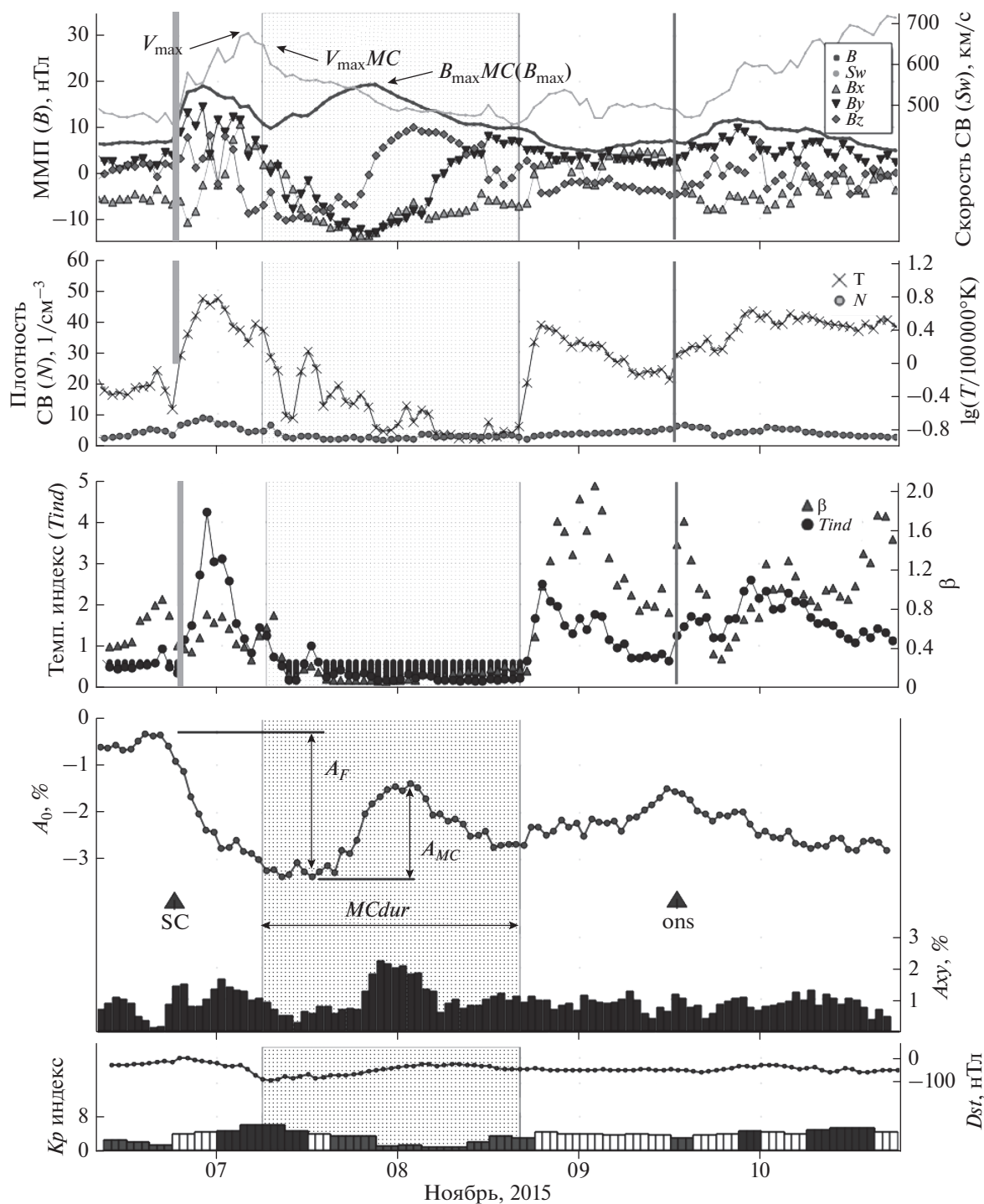


Рис. 1. Поведение основных параметров солнечного ветра, космических лучей и геомагнитной активности во время прохождения магнитного облака мимо Земли 7–8 ноября 2015 г.

ри МО ($B_{\max} MC$), которое в данном случае является и максимальным значением ММП для всего события. На четвертой панели указаны величина Форбуш-эффекта (A_F), амплитуда вариаций КЛ внутри МО (A_{MC}) и продолжительность МО в часах ($MCdur$). Отметим, что мы не определяем са-

мостоятельно продолжительность магнитного облака, а используем то значение, которое указано в списках магнитных облаков, перечисленных в разделе Данные и методы. Для Форбуш-эффектов трудно определить момент, когда они заканчиваются. Если бы можно было наблюдать один

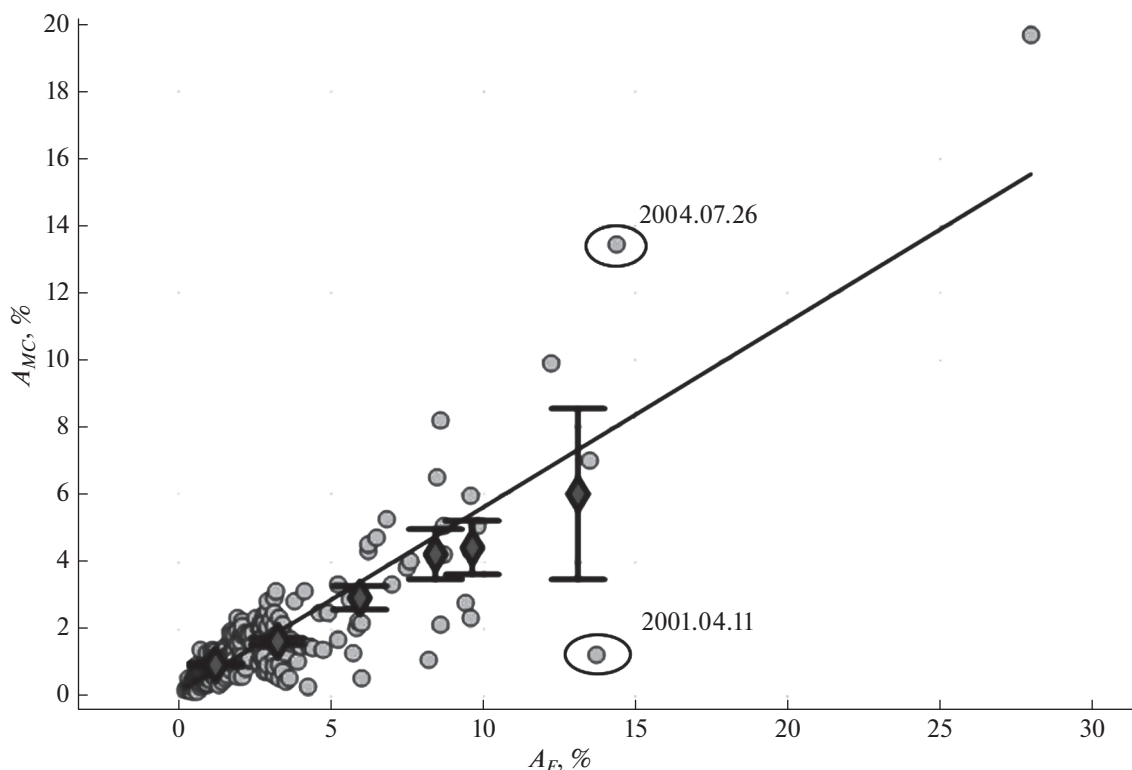


Рис. 2. Связь величины Форбуш-эффекта (A_F) с величиной вариаций КЛ внутри магнитного облака (A_{MC}).

ФЭ с начала до конца, то он мог бы продолжаться и несколько недель. Но обилие межпланетных возмущений обычно не позволяет наблюдать ФЭ до конца, поэтому окончание Форбуш-эффекта чаще всего совпадает с началом следующего межпланетного возмущения. Началом события обычно считается регистрация SSC или (в отсутствие SSC) резкие изменения основных параметров межпланетной среды (скорости солнечного ветра и/или ММП) или космических лучей.

Как видно из рис. 1, основные особенности магнитного облака явно выражены во всех приведенных параметрах: общее магнитное поле облака достаточно высокое ($B_{max} = 19.4$ нТл), вектор поля плавно вращается на большой угол (верхняя панель); скорость плавно падает на протяжении всего МО; зарегистрированы низкие значения плазменной бета (третья панель); температурный индекс также значительно ниже единицы, что согласно [Мелкумян и др., 2020; Melkumyan et al., 2021] является явным признаком МО. В магнитных облаках с максимумом поля в середине облака довольно часто в вариациях КЛ внутри МО наблюдается локальный максимум КЛ, как в приведенном на рисунке примере. Подробно поведение КЛ внутри магнитных облаков мы предполагаем рассмотреть и проанализировать в следующих работах.

3.1. Вклад магнитных облаков в величину Форбуш-эффектов

Рассмотрим соотношение величины вариаций КЛ внутри МО (A_{MC}) и общей величины ФЭ (A_F). На рисунке 2 представлены результаты. Из рисунка видно, что связь между амплитудой Форбуш-эффекта и вариациями плотности КЛ внутри МО существует ($r = 0.86 \pm 0.03$). Также можно заключить, что вклад МО в амплитуду ФЭ – значителен в большинстве случаев, примерно 60% вариаций КЛ регистрируются внутри МО. Но есть события с гораздо большим вкладом, например ФЭ 26.07.2004 г., в котором общая величина составила $A_F = 14.4\%$, а вариации внутри МО $A_{MC} = 13.4\%$, что в процентном соотношении составляет ~93%.

Так же на рисунке выделена выпадающая точка, которая относится к событию 11.04.2001 г. В нем вклад МО в амплитуду ФЭ достаточно мал (менее 10%) относительно общей величины ($A_F = 13.7\%$, $A_{MC} = 1.22\%$). Данное событие рассматривалось несколькими авторами, например, [Sun et al., 2002; Kuwabara et al., 2009]) и были описаны его отличия от подобных корональных выбросов с МО, как по части геоэффективности, так и нетипичного поведения космических лучей из-за особенностей расположения магнитной структуры и прохождения вблизи Земли. Следует обра-

тратить внимание на то, что при примерно одинаковых величинах ФЭ (A_F) в выделенных аномальных событиях, вклад МО в величину ФЭ отличается почти в 10 раз.

Таким образом, вклад МО в общую величину ФЭ существенен и является основным. Полученные здесь результаты, скорее нижняя оценка влияния МО, т.к. понятно, что механизм ФЭ связан с расширением МО, и их вклад в ФЭ не ограничивается той вариацией, которая наблюдается внутри МО.

Выводы о слабом влиянии МО, к которым пришли некоторые авторы, например, [Lockwood et al., 1991], по-видимому, обусловлены не только причинами, связанными с качеством исходных данных, не освобожденных от влияния анизотропии КЛ, но и малым числом исследуемых событий и используемых детекторов. Не менее важно и то обстоятельство, что в некоторых МО вместо понижения плотности наблюдается ее возрастание [Белов и др., 2015].

3.2. Поведение основных параметров солнечного ветра внутри МО

Мы рассмотрели, как связаны основные параметры солнечного ветра во всем межпланетном возмущении и в самом магнитном облаке. На рисунке 3 приведены соотношения максимальных значений скорости (рис. 3а) и поля (рис. 3б) во всем межпланетном возмущении и в самом магнитном облаке.

Из рисунка 3 видно, что связь между максимальными значениями скорости солнечного ветра и ММП внутри МО и во всем межпланетном возмущении очень тесная ($r(V) = 0.96 \pm 0.02$, $r(B) = 0.89 \pm 0.03$), а во многих случаях – максимальные величины наблюдаются именно внутри МО (точки, лежащие на биссектрисе). Это свидетельствует о том, что параметры МО являются основными и определяющими, т.е. если корональный выброс имеет высокую скорость, то и все межпланетное возмущение, включающее МО, достаточно высокоскоростное. Отметим, что данные о скорости солнечного ветра 29 и 30 октября 2003 г. ($V_{\max} > 1500$ км/с), которые используются на рис. 3а и далее, получены по спектру ионов He^{++} , измеренному прибором SWICS на борту космического корабля ACE, и взяты нами из работы [Panasuk et al., 2004].

Точки выше биссектрисы – это события, в которых в конце МО начиналось следующее межпланетное возмущение, набегающее на первое. В базе данных FEID параметры ФЭ и межпланетного возмущения считаются до начала следующего события, а параметры в МО считаются на протяжении всего МО. Таким образом, если в конце еще не закончившегося МО начинается новое со-

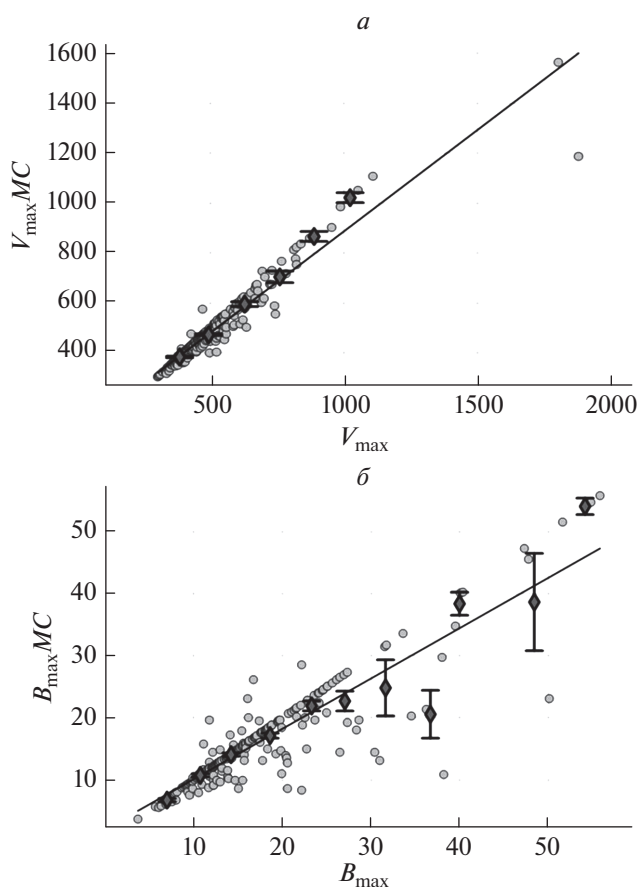


Рис. 3. Связь максимальной величины скорости солнечного ветра – (а) и межпланетного магнитного поля – (б) во всем межпланетном возмущении и внутри магнитного облака.

бытие, т.е. регистрируется приход нового межпланетного возмущения, то параметры ФЭ считаются не до конца МО, а до момента регистрации нового SSC или резких изменений скорости СВ и/или индукции ММП (т.е. начала следующего межпланетного возмущения).

Далее мы рассмотрели время положения максимальных значений основных параметров СВ внутри магнитных облаков. Мы определили эти временные параметры в процентах от продолжительности, а не в часах, поэтому можем сравнить все МО, любой длительности. На рисунке 4 приведены гистограммы распределения времени максимальных значений скорости (рис. 4а) и поля (рис. 4б) внутри МО.

По распределению времени достижения максимальных значений параметров солнечного ветра можно отметить, что чаще всего максимальная скорость СВ внутри магнитного облака регистрируется в начале МО (в 159 МО, в интервале времени 0–20%), но также есть группа событий (18 МО), в которых максимальная скорость наблюдается в

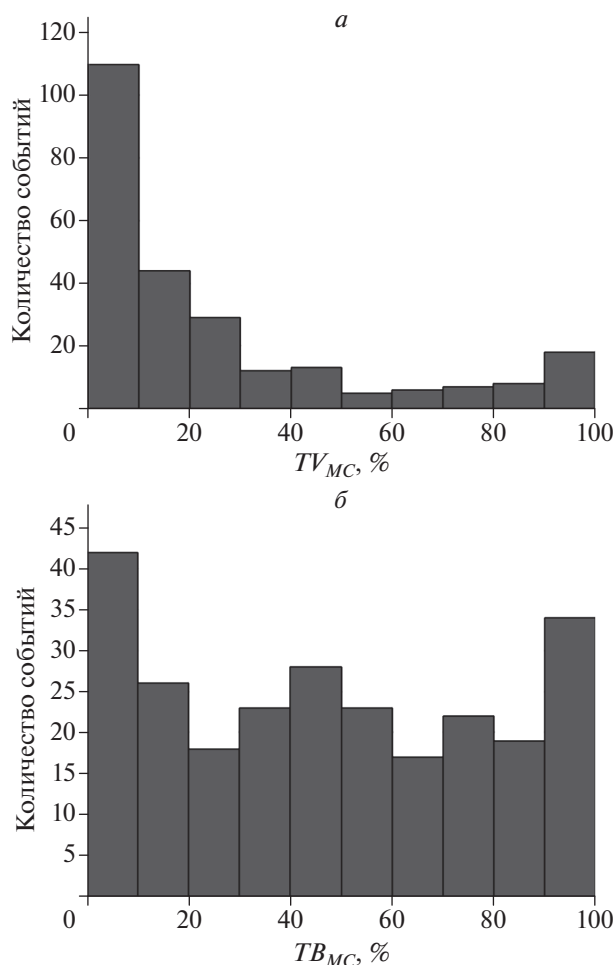


Рис. 4. Распределение времени максимальных значений скорости солнечного ветра – (а) и межпланетного магнитного поля – (б) внутри магнитного облака.

последние часы (в интервале времени 90–100%). В поведении положения максимального поля внутри МО наблюдается несколько другая картина. Явно выделяются три группы событий: первая – максимум ММП регистрируется в начале события (0–20%) у 69 магнитных облаков, вторая – максимум ММП достигается в середине события (для 74 МО, в интервале времени 30–60%), третья – максимум ММП регистрируется в конце события: у 34 МО время максимума регистрируется в последние 10% времени прохождения МО мимо Земли. Отметим, что в последнюю группу входят события с взаимодействием со следующим межпланетным возмущением в конце. На рисунке 5 приведен пример подобного межпланетного возмущения. Форбуш-эффект начался с регистрации SSC 21.12.2014 г. в 19:11 UT (первая вертикальная светло-серая линия, SC), магнитное облако началось 22.12.2014 г. в 4:00 UT и длилось 13 ч (до 17:00 UT), а в 15:10 UT (почти за два часа до окончания МО) было зарегистрировано следующее SSC (вторая вер-

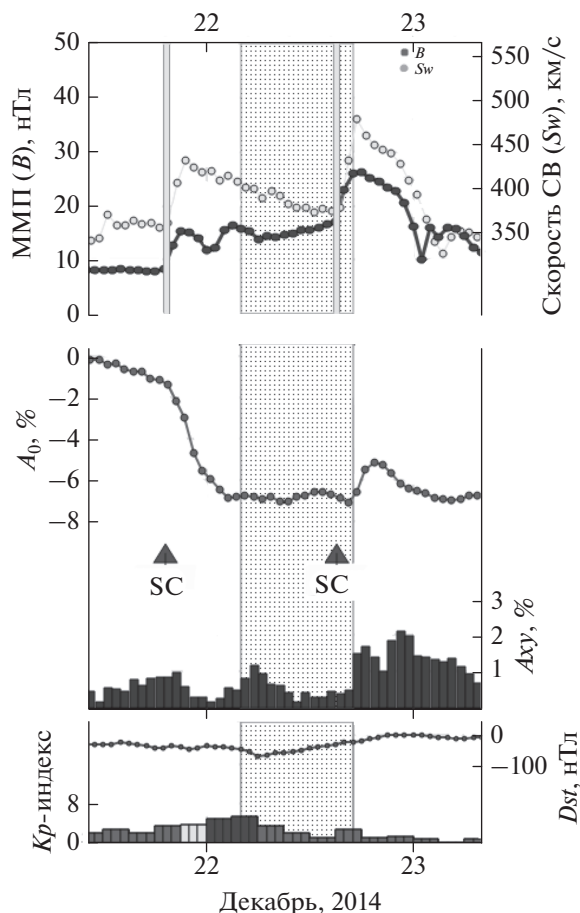


Рис. 5. Пример Форбуш-эффекта в декабре 2014 г., созданного межпланетным возмущением с магнитным облаком, взаимодействующего со следующим межпланетным возмущением.

тикальная светло-серая линия, SC). Вследствие этого взаимодействия в конце МО начался рост скорости солнечного ветра и индукции ММП.

3.3. Связь вариаций плотности КЛ с параметрами солнечного ветра внутри МО

Мы рассмотрели связь вариаций плотности КЛ (A_{MC}) со скоростью солнечного ветра и полем внутри МО. Мы использовали параметр $VmVm$, который характеризует возмущенность солнечного ветра и нормирован следующим образом: $VmVm = (V_{max} B_{max}) / (V_0 B_0)$, где V_0 и B_0 параметры невозмущенной межпланетной среды (обычно используются $V_0 = 400$ км/с, а $B_0 = 5$ нТл). На рисунке 6 приведено соотношение указанных параметров. Коэффициент корреляции составляет $r = 0.79 \pm 0.04$. Полученная достаточно тесная связь показывает, что понижение КЛ в МО обусловлено в первую очередь параметрами самого МО.

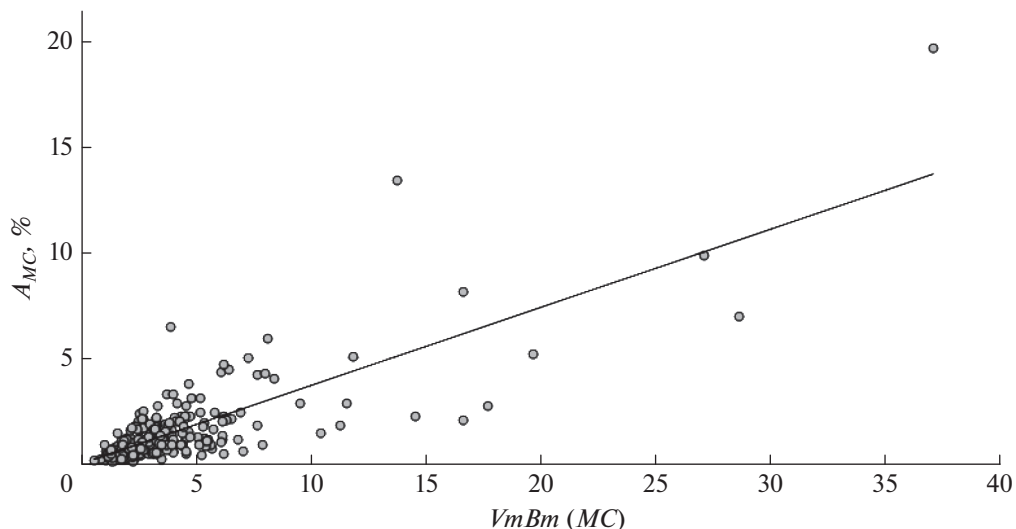


Рис. 6. Связь величины вариаций КЛ внутри магнитного облака (A_{MC}) с произведением максимальных значений скорости солнечного ветра и межпланетного магнитного поля внутри магнитного облака.

3.4. Связь вариаций плотности КЛ внутри МО с размерами МО

Для изучения связи вариаций КЛ внутри МО с размерами МО, помимо длительности МО в часах (параметр $MCdur$) мы рассчитали еще два параметра: Lr_{MC} – размер МО в гирорадиусах (для частиц с жесткостью 10 ГВ) и L_{MC} – размер МО в астрономических единицах. Известно, что магнитная жесткость R связана с гирорадиусом r как $R = 300Vr$, поэтому размер МО в гирорадиусах (для частиц с жесткостью 10 ГВ) рассчитывался по формуле:

$$Lr_{MC} = 3 \times 10^{-8} \sum_{k=1}^n V_k B_k \Delta t,$$

где V_k , см/с и B_k , Гс – текущие значения скорости СВ и индукции ММП на отрезке времени Δt , с. Поскольку параметр Lr_{MC} нормируется на гирорадиус, он получается безразмерный и показывает количество гирорадиусов внутри МО для частиц с жесткостью 10 ГВ.

Размер МО в астрономических единицах L_{MC} рассчитывался как произведение средней скорости МО на время его прохождения мимо Земли.

Полученные результаты приведены на рис. 7. Связь вариаций плотности КЛ внутри МО (A_{MC}) с размером МО в гирорадиусах очевидна (коэффициент корреляции $r(Lr_{MC}) = 0.72 \pm 0.04$, рис. 7а). Но связь с размером в астрономических единицах слабая ($r(L_{MC}) = 0.37 \pm 0.06$, рис. 7б), а с продолжительностью магнитного облака в часах не наблюдается ($r(MCdur) = 0.07 \pm 0.06$, рис. 7в).

3.5. Средние значения основных параметров

Нами были рассчитаны средние значения основных параметров солнечного ветра, геомагнитной активности и космических лучей для Форбуш-эффектов, источниками которых были межпланетные возмущения, содержащие МО, а также отдельно для МО. В таблице 1 приведены следующие обозначения: A_F – амплитуда ФЭ, B_{max} и V_{max} – максимальные значения ММП и скорости СВ в межпланетном возмущении; Kp_{max} , Ap_{max} , Dst_{min} – экстремальные индексы геомагнитной активности во время межпланетного возмущения; A_{MC} – вариации плотности КЛ внутри МО; $MCdur$ – продолжительность МО в часах; $B_{max}MC$ и TB_{MC} – максимальное поле в МО и время его достижения в процентах от начала МО; $V_{max}MC$ и TV_{MC} – максимальная скорость СВ в МО и время ее достижения в процентах от начала МО; DV_{MC} – изменение скорости солнечного ветра внутри МО; L_{MC} – размер МО в а. е.; Lr_{MC} – размер МО в гирорадиусах (для частиц с жесткостью 10 ГВ).

Из таблицы 1 видно, что в среднем, вариации КЛ в МО составляют 60% от всей величины ФЭ ($A_{MC} = 1.6\%$, $A_F = 2.6\%$). Скорость солнечного ветра в МО обычно убывает, и, в среднем, она убывает на 79 км/с (параметр DV_{MC}). Но вместе с тем, есть МО со значительным изменением скорости (~600 км/с), а есть и такие, в которых скорость практически не меняется (~4 км/с). Максимальные значения скорости СВ и ММП во всем межпланетном возмущении и внутри МО довольно близки. Обсуждая геомагнитную активность, следует отметить, что во время межпланетных возмущений, содержащих МО, обычно регистрируется малая геомагнитная буря ($Kp_{max} = 5$, $Dst_{min} =$

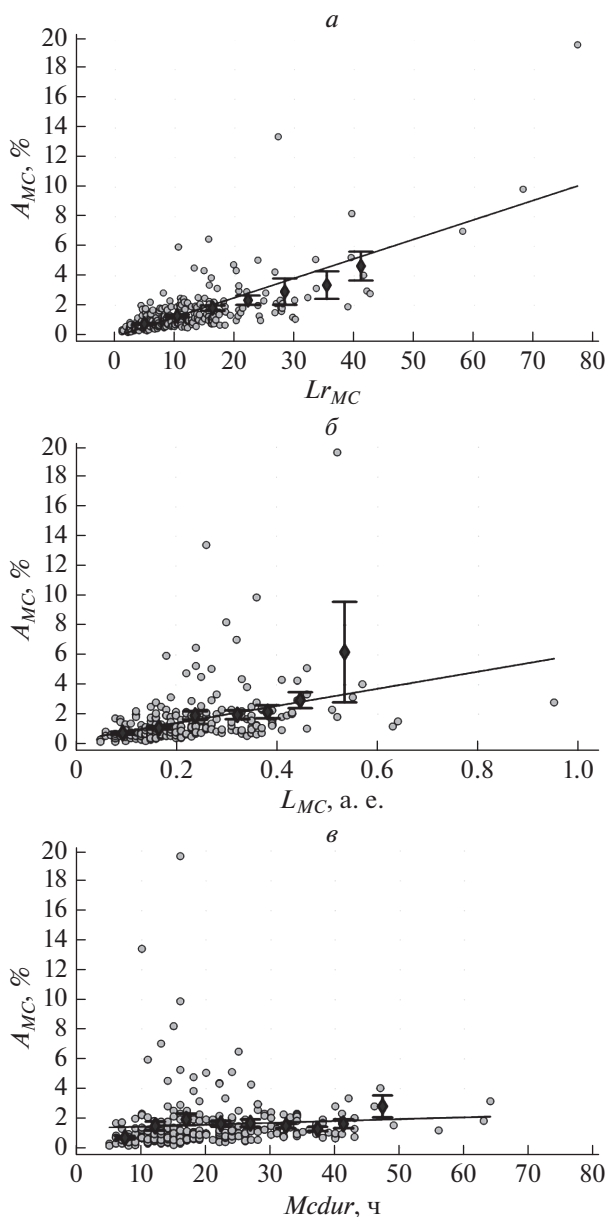


Рис. 7. Связь величины вариаций КЛ внутри магнитного облака (A_{MC}) с (а) – размером МО в гирорадиусах (для частиц с жесткостью 10 ГВ) (Lr_{MC}), (б) – размером в астрономических единицах (L_{MC}) и (в) – продолжительностью магнитного облака в часах ($MCdur$).

= -71.8 нТл). Отметим, что три самые большие геомагнитные бури за 1995–2019 гг. с $Kp_{max} = 9$ были зарегистрированы во время межпланетных возмущений, содержащих магнитные облака (15 июля 2000 г., 29 и 30 октября 2003 г.). Амплитуда вариаций КЛ внутри магнитных облаков, в среднем составляет 60–70% от общей величины, но есть события, в которых вариации внутри МО очень малы (0.14%). Средняя продолжительность МО почти 21 ч, хотя были зарегистрированы случаи с продолжительностью более 50 ч (3 МО) и менее 10 ч (26 МО). Размер МО в гирорадиусах

(для частиц с жесткостью 10 ГВ) в среднем получился 12.7, но иногда бывают значения много меньше (1.13) или значительно больше (77.26).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы выделили и изучили межпланетные возмущения, содержащие магнитные облака, и связанные с ними Форбуш-эффекты. К настоящему времени 252 события за 1995–2019 гг. со всеми сопутствующими параметрами (http://spaceweather.izmiran.ru/dbs/mc/list_mc_252.pdf) включены

Таблица 1. Средние значения основных параметров

Параметр	Среднее	Max	Min
Параметры межпланетного возмущения			
A_F , %	2.6 ± 0.2	28.0	0.2
B_{\max} , нТ	16.7 ± 0.5	55.8	3.7
V_{\max} , км/с	502.0 ± 11.4	1850.0	304.0
Kp_{\max}	5.0 ± 0.1	9.0	0.7
Ap_{\max} , 2нТ	70.7 ± 4.5	400.0	3.0
Dst_{\min} , нТ	-71.8 ± 4.2	4.0	-422
Параметры внутри магнитного облака			
A_{MC} , %	1.6 ± 0.1	19.7	0.14
$MCdur$, ч	20.8 ± 0.7	64.0	5.0
B_{\max}^{MC} , нТ	15.5 ± 0.5	55.8	3.7
TB_{MC} , %	47.4 ± 2.0	100.0	0.0
V_{\max}^{MC} , км/с	481.9 ± 9.7	1565.0	304.0
TV_{MC} , %	24.6 ± 1.9	100.0	0.0
DV_{MC} , км/с	78.8 ± 4.5	598.0	4.0
L_{MC} , а.е.	0.2 ± 0.01	0.95	0.05
Lr_{MC}	12.7 ± 0.6	77.26	1.13

в общую базу данных FEID (<http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html>) и являются ее важной составной частью.

Полученные данные позволяют проводить статистические исследования и получать статистически значимые результаты. Один из главных результатов заключается в том, что МО создают большую часть Форбуш-эффекта, т.е. подтверждаются выводы других авторов, например, [Richardson and Cane, 2011], на значительно большем статистическом материале и на более точных исходных данных, чем в более ранних работах.

Вариации КЛ внутри МО тесно связаны с максимальными параметрами солнечного ветра и ММП внутри магнитных облаков и отличаются разнообразием. В некоторых случаях МО вызывает значительные вариации (до 90% общей величины ФЭ), но есть события, в которых понижения почти незаметны (менее 10% общей величины ФЭ).

Изученные нами МО весьма разнообразны, у них разная продолжительность, различные величина и поведение скорости солнечного ветра и межпланетного магнитного поля.

По распределению времени максимальных параметров солнечного ветра можно отметить, что чаще всего максимальная скорость СВ внутри магнитного облака регистрируется в начале МО, а максимальное значение ММП наблюдается как в начале, так и в середине события. Однако существует ряд событий, в которых указанные макси-

мумы наблюдаются в последние часы МО. Это связано с тем, что на еще не закончившееся МО “налетают” следующее межпланетное возмущение, и увеличение параметров происходит из-за взаимодействия со следующим возмущением солнечного ветра.

Наблюдается достаточно тесная корреляция вариаций плотности КЛ в МО с размером МО, выраженным в гирорадиусах (для частиц с жесткостью 10 ГВ), но не с длительностью МО в часах или размером в астрономических единицах.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны коллективам мировой сети станций космических лучей, обеспечивающим данные непрерывной регистрации нейтронной компоненты: (http://cr0.izmiran.ru/ThankYou/Our_Acknowledgment.pdf), благодарим базу данных NMDB (www.nmdb.eu). Работа базируется на экспериментальных данных УНУ “Российская национальная сеть станций космических лучей”.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Абунина М.А., Абуни А.А. и Белов А.В. поддержаны грантом Российского научного фонда № 20-72-10023.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белов А.В., Абуни А.А., Абунина М.А., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Вариации плотности галактических космических лучей в магнитных облаках // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 55. № 4. С. 445–456. 2015. <https://doi.org/10.7868/S0016794015040021>
- Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке В.Г., Оленева В.А., Абунина М.А., Абуни А.А. Метод глобальной съемки для мировой сети нейтронных мониторов // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 58. № 3. С. 374–389. 2018. <https://doi.org/10.7868/S0016794018030082>
- Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Абуни А.А., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Поведение скорости и температуры солнечного ветра в межпланетных возмущениях, создающих Форбуш-понижения // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 60. № 5. С. 547–556. 2020. <https://doi.org/10.31857/S0016794020040100>
- Badruddin, Yadav R.S., Yadav N.R. Influence of magnetic clouds on cosmic ray intensity variation // Solar Phys. V. 105. I. 2. P. 413–428. 1986. <https://doi.org/10.1007/BF00172057>
- Belov A.V. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena / Proc. IAU Symposium. V. 257. P. 439–450. 2009. <https://doi.org/10.1017/S1743921309029676>
- Burlaga L., Sittler E., Mariani F., Schwenn R. Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios, and IMP 8 observations // J. Geophys. Res. V. 86. P. 6673–6684. 1981. <https://doi.org/10.1029/JA086iA08p06673>

- *Burlaga L.F., Behannon K.W.* Magnetic clouds: Voyager observations between 2 and 4 AU // *Solar Phys.* V. 81. P. 181–192. 1982.
<https://doi.org/10.1007/BF00151989>
- *Burlaga L.* Magnetic Clouds / *Physics of the Inner Heliosphere II. Physics and Chemistry in Space (Space and Solar Physics)*. V. 21. Eds. Schwenn R., Marsch E. Berlin, Heidelberg: Springer, 352 p. 1991.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-75364-0_1
- *Bothmer V., Schwenn R.* Eruptive prominences as sources of magnetic clouds in the solar wind // *Space Sci. Rev.* V. 70. P. 215–220. 1994.
<https://doi.org/10.1007/BF00777872>
- *Bothmer V., Schwenn R.* The structure and origin of magnetic clouds in the solar wind // *Ann. Geophys.* V. 16. P. 1–24. 1998.
<https://doi.org/10.1007/s00585-997-0001-x>
- *Cane H.V.* Coronal Mass Ejections and Forbush Decreases // *Space Sci. Rev.* V. 93. P. 55–77. 2000.
<https://doi.org/10.1023/A:1026532125747>
- *Dumbović M., Vr̂snak B., Guo J. et al.* Evolution of Coronal Mass Ejections and the Corresponding Forbush Decreases: Modeling vs. Multi-Spacecraft Observations // *Solar Phys.* V. 295. № 104. 2020.
<https://doi.org/10.1007/s11207-020-01671-7>
- *Echer E., Alves M.V., Gonzalez W.D.* A statistical study of magnetic cloud parameters and geoeffectiveness // *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* V. 67. I. 10. P. 839–852. 2005.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.02.010>
- *Forbush S.E.* On the effects in cosmic-ray intensity observed during the recent magnetic storm // *Phys. Rev.* V. 51. P. 1108–1109. 1937.
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.51.1108.3>
- *Forbush S.* On cosmic-ray effects associated with magnetic storms // *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity.* V. 43. P. 203–218. 1938.
<https://doi.org/10.1029/TE043i003p00203>
- *Goldstein H.* On the field configuration in magnetic clouds / *Solar Wind Five*. Ed. M. Neugebauer. NASA Conf. Publ. 2280. P. 731–733. 1983.
- *Gopalswamy N., Xie H., Mäkelä P., Akiyama S., Yashiro S., Kaiser M.L., Howard R.A., Bougeret J.-L.* Interplanetary shocks lacking type II radio bursts // *Astrophys. J.* V. 710. P. 1111–1126. 2010.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/710/2/1111>
- *Gopalswamy N., Yashiro S., Xie H., Akiyama S., Mäkelä P.* Properties and geoeffectiveness of magnetic clouds during solar cycles 23 and 24 // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* V. 120. I. 11. P. 9221–9245. 2015.
<https://doi.org/10.1002/2015JA021446>
- *Gosling J.T., Bame S.J., McComas D.J., Phillips J.L.* Coronal mass ejections and large geomagnetic storms // *Geophys. Res. Lett.* V. 17. I. 7. P. 901–904. 1990.
<https://doi.org/10.1029/GL017i007p00901>
- *Gosling J.T., McComas D.J., Phillips J.L., Bame J.* Geomagnetic activity associated with earth passage of interplanetary shock disturbances and coronal mass ejections // *J. Geophys. Res.* V. 96. P. 7831–7839. 1991.
<https://doi.org/10.1029/91JA00316>
- *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.* V. 23. P. 625–641. 2005.
<https://doi.org/10.5194/angeo-23-625-2005>
- *Klein L., Burlaga L.* Interplanetary magnetic clouds at 1 AU // *J. Geophys. Res.* V. 87. I. A2. P. 613–624. 1982.
<https://doi.org/10.1029/JA087iA02p00613>
- *Kumar A., Badruddin.* Interplanetary coronal mass ejections, associated features, and transient modulation of galactic cosmic rays // *Solar Phys.* V. 289. P. 2177–2205. 2014.
<https://doi.org/10.1007/s11207-013-0465-7>
- *Kuwabara T., Bieber J.W., Evenson P. et al.* Determination of interplanetary coronal mass ejection geometry and orientation from ground-based observations of galactic cosmic rays // *J. Geophys. Res.* V. 114. I. A5. A05109. 2009.
<https://doi.org/10.1029/2008JA013717>
- *Lepping R.P., Jones J.A., Burlaga L.F.* Magnetic field structure of interplanetary magnetic clouds at 1 AU // *J. Geophys. Res.* V. 95. I. A8. P. 11957–11965. 1990.
<https://doi.org/10.1029/JA095iA08p11957>
- *Lepping R.P., Wu C.-C., Berdichevsky D.B., Szabo A.* Model Fitting of Wind Magnetic Clouds for the Period 2004–2006 // *Solar Phys.* V. 295. № 83. 2020.
<https://doi.org/10.1007/s11207-020-01630-2>
- *Li Y., Luhmann J.G., Lynch B.J.* Magnetic Clouds: Solar Cycle Dependence, Sources, and Geomagnetic Impacts // *Solar Phys.* V. 293. № 135. 2018.
<https://doi.org/10.1007/s11207-018-1356-8>
- *Lockwood J.A., Webber W.R., Debrunner H.* Forbush decreases and interplanetary magnetic field disturbances: Association with magnetic clouds // *J. Geophys. Res.* V. 96. I. A7. P. 11587–11604. 1991.
<https://doi.org/10.1029/91JA01012>
- *Lynch B.J., Zurbuchen T.H., Fisk L.A.* Internal structure of magnetic clouds: Plasma and composition // *J. Geophys. Res.* V. 108. I. A6. 1239. 2003.
<https://doi.org/10.1029/2002JA009591>
- *Marubashi K., Lepping R.* Long-duration magnetic clouds: a comparison of analyses using torus- and cylinder-shaped flux rope models // *Ann. Geophys.* V. 25. I. 11. P. 2453–2477. 2007.
<https://doi.org/10.5194/angeo-25-2453-2007>
- *Mas’ias-Meza J.J., Dasso S., D’emoulin P., Rodriguez L., Janvier M.* Superposed epoch study of ICME substructures near Earth and their effects on Galactic cosmic rays // *Astronomy & Astrophys.* V. 592. № A118. 2016.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628571>
- *Melkumyan A.A., Belov A.V., Abunina M.A., Abunin A.A., Eroshenko E.A., Yanke V.G., Oleneva V.A.* Solar wind temperature–velocity relationship over the last five solar cycles and Forbush decreases associated with different types of interplanetary disturbance // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* V. 500. P. 2786–8797. 2021.
<https://doi.org/10.1093/mnras/staa3366>
- *Mulligan T., Russell C.T.* Multispacecraft modeling of the flux rope structure of interplanetary coronal mass ejections: Cylindrically symmetric versus nonsymmetric topologies // *J. Geophys. Res.* V. 106. P. 10581–10596. 2001.
<https://doi.org/10.1029/2000JA900170>
- *Panasjuk M.I., Kuznetsov S.N., Lazutin L.L. et al.* Magnetic Storms in October 2003 // *Cosmic Res.* V. 42. P. 489–535. 2004.
<https://doi.org/10.1023/B:COSM.0000046230.62353.61>

- *Papaioannou A., Belov A., Abunina M., Eroshenko E., Abunin A., Anastasiadis A., Patsourakos S., Mavromichalaki H.* Interplanetary Coronal Mass Ejections as the Driver of Non-recurrent Forbush Decreases // *Astrophys. J.* V. 890. № 101. 2020.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab6bd1>
- *Parnahaj I., Kudela K.* Forbush decreases at a middle latitude neutron monitor: relations to geomagnetic activity and to interplanetary plasma structures // *Astrophys. Space Sci.* V. 359. № 35. 2015.
<https://doi.org/10.1007/s10509-015-2484-3>
- *Petukhova A.S., Petukhov I.S., Petukhov S.I.* Forbush Decrease Characteristics in a Magnetic Cloud // *Space Weather.* V. 18. № e2020SW002616. 2020.
<https://doi.org/10.1029/2020SW002616>
- *Richardson I.G.* Solar wind stream interaction regions throughout the heliosphere // *Living Reviews in Solar Physics.* V. 15. № 1. 2018.
<https://doi.org/10.1007/s41116-017-0011-z>
- *Richardson I.G., Cane H.V.* The fraction of interplanetary coronal mass ejections that are magnetic clouds: Evidence for a solar cycle variation // *Geophys. Res. Lett.* V. 31. № L18804. 2004.
<https://doi.org/10.1029/2004GL020958>
- *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.* V. 264. P. 189–237. 2010a.
<https://doi.org/10.1007/s11207-010-9568-6>
- *Richardson I.G., Cane H.V.* Interplanetary Coronal Mass Ejections During Solar Cycle 23/12 International Solar Wind Conference. AIP Conference Proceedings. V. 1216. P. 683–686. 2010b.
<https://doi.org/10.1063/1.3395959>
- *Richardson I.G., Cane H.V.* Galactic Cosmic Ray Intensity Response to Interplanetary Coronal Mass Ejections/Magnetic Clouds in 1995–2009 // *Solar Phys.* V. 270. P. 609–627. 2011.
<https://doi.org/10.1007/s11207-011-9774-x>
- *Ruffenach A., Lavraud B., Farrugia C.J. et al.* Statistical study of magnetic cloud erosion by magnetic reconnection // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* V. 120. P. 43–60. 2015.
<https://doi.org/10.1002/2014JA020628>
- *Sun W., Dryer M., Fry C.D., Deehr C.S., Smith Z., Aka-sofu S.-I., Kartalev M.D., Grigorov K.G.* Real-time forecasting of ICME shock arrivals at L1 during the “April Fool’s Day” epoch: 28 March–21 April 2001 // *Ann. Geophys.* V. 20. P. 937–945. 2002.
<https://doi.org/10.5194/angeo-20-937-2002>
- *Zhang G., Burlaga L.* Magnetic clouds, geomagnetic disturbances, and cosmic ray decreases // *J. Geophys. Res.* V. 93. I. A4. P. 2511–2518. 1988.
<https://doi.org/10.1029/JA093iA04p02511>