

**ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ
И ПЛОТНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ
В СИЛЬНЫХ ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЯХ,
СВЯЗАННЫХ С МАГНИТНЫМИ ОБЛАКАМИ**

**PECULIARITIES OF MEDIUM PARAMETER DYNAMICS
AND COSMIC RAY DENSITY IN STRONG FORBUSH DECREASES
ASSOCIATED WITH MAGNETIC CLOUDS**

А.С. Петухова *Институт космофизических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, petukhova@ikfia.ysn.ru***И.С. Петухов** *Институт космофизических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, i_van@ikfia.ysn.ru***С.И. Петухов** *Институт космофизических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, petukhov@ikfia.ysn.ru***И.С. Готовцев***Институт космофизических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, i_gotovtsev@mail.ru***A.S. Petukhova***Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy of SB RAS,
Yakutsk, Russia, petukhova@ikfia.ysn.ru***I.S. Petukhov***Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy of SB RAS,
Yakutsk, Russia, i_van@ikfia.ysn.ru***S.I. Petukhov***Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy of SB RAS,
Yakutsk, Russia, petukhov@ikfia.ysn.ru***I.S. Gotovtsev***Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy of SB RAS,
Yakutsk, Russia, i_gotovtsev@mail.ru*

Аннотация. Диффузионный и электромагнитный механизмы определяют формирование спорадических форбуш-понижений (ФП). Диффузионный механизм влияет на амплитуду ФП ($A_{\text{ФП}}$) в турбулентном слое и части коронального выброса массы (КВМ), предшествующей магнитному облаку, и его эффективность зависит от уровня турбулентности магнитного поля. Электромагнитный механизм работает в магнитном облаке, и его эффективность зависит от напряженности регулярных магнитных и электрических полей. Мы анализируем параметры солнечного ветра и характеристики космических лучей, применяя метод наложенных эпох.

В 1996–2006 гг. было зарегистрировано 23 сильных ФП ($A_{\text{ФП}} > 5\%$). Средняя амплитуда 7% в равной степени формируется обоими механизмами. События можно разделить на две группы в зависимости от вклада механизмов в амплитуду ФП. Группа 1 включает самые сильные ФП ($A_{\text{ФП1}} = 8.5\%$), образованные как диффузионным, так и электромагнитным механизмами: диффузионный механизм отвечает за $0.26A_{\text{ФП1}}$, а электромагнитный — за $0.74A_{\text{ФП1}}$. В группе 2 амплитуда $A_{\text{ФП2}}$ составляет 5.7%, причем диффузионный механизм формирует $0.79A_{\text{ФП2}}$, а электромагнитный — $0.21A_{\text{ФП2}}$. Пространственные распределения средних значений параметров среды в области возмущений в группах 1 и 2 различаются. Это различие может быть объяснено тем фактом, что ФП в группах 1 и 2 формируются в центральной и периферийной частях КВМ соответственно.

Abstract. Diffusion and electromagnetic mechanisms determine the formation of sporadic Forbush decreases (FDs). The diffusion mechanism affects the FD amplitude (A_{FD}) in the turbulent layer, and the part of the coronal mass ejection (CME) preceding the magnetic cloud, and its efficiency depends on the level of magnetic field turbulence. The electromagnetic mechanism works in a magnetic cloud, and its efficiency depends on the intensity of regular magnetic and electric fields. We analyze solar wind parameters and cosmic ray density, using the superposed epoch analysis. In 1996–2006, 23 strong FDs ($A_{\text{FD}} > 5\%$) were detected. The average amplitude of 7% is equally formed by both mechanisms. The events can be divided into 2 groups depending on the contribution of the mechanisms to A_{FD} . Group 1 includes the strongest FDs ($A_{\text{FD1}} = 8.5\%$), formed by both diffusion and electromagnetic mechanisms. The diffusion mechanism forms $0.26A_{\text{FD1}}$, and the electromagnetic mechanism is responsible for $0.74A_{\text{FD1}}$. In group 2, the amplitude $A_{\text{FD2}} = 5.7\%$, the diffusion mechanism forms $0.79A_{\text{FD2}}$ of the amplitude; and the electromagnetic one, $0.21A_{\text{FD2}}$. The spatial distributions of the mean values of the medium parameters in the region of disturbances in the groups differ. This difference can be explained by the fact that A_{FD} in groups 1 and 2 are formed in the central and peripheral parts of CME respectively.

Keywords: cosmic rays, coronal mass ejection, Forbush decrease, solar wind, interplanetary magnetic field, shock, magnetic cloud.

Ключевые слова: космические лучи, выброс корональной массы, форбуш-понижение, солнечный ветер, межпланетное магнитное поле, ударная волна, магнитное облако.

ВВЕДЕНИЕ

Корональные выбросы массы (КВМ) выносят плазму из солнечной атмосферы в межпланетное пространство. В некоторых случаях вместе с веществом выносятся крупномасштабная петля со спиральным магнитным полем, называемая магнитным облаком (МО). На расстоянии 1 а.е. от Солнца примерно у 1/3 КВМ проявляются признаки МО [Richardson, Cane, 2011]. Фронт межпланетной ударной волны (МУВ) возникает перед КВМ, движущимся со сверхзвуковой скоростью относительно солнечного ветра. Область между фронтом МУВ и передней кромкой КВМ называется турбулентным слоем. В этой области плотность энергии регулярного (плавно меняющегося во времени и пространстве) и турбулентного (резко меняющегося во времени и пространстве) магнитных полей значительно возрастает. Увеличение энергии регулярного и турбулентного магнитных полей вызвано воздействием ударного фронта МУВ и КВМ. КВМ являются наиболее мощными явлениями солнечной активности, поскольку они сильно влияют на свойства плазмы солнечного ветра, геомагнитную активность [Kilua et al., 2017] и пространственно-временное распределение космических лучей (КЛ) [Belov et al., 2014]. Важная роль процессов в солнечной атмосфере в формировании космической погоды обуславливает неослабевающий интерес к КВМ в гелиосферных исследованиях. Результаты локальных измерений на космических аппаратах и их экстраполяция на большие масштабы обычно используются для определения формы и свойств КВМ. Однако возможность выявления и определения крупномасштабных свойств КВМ с использованием только локальных измерений ограничена. Благодаря своей высокой мобильности КЛ содержат информацию, которая может отсутствовать в локальных измерениях. Результат воздействия КВМ на КЛ, выраженный в виде изменения скорости счета наземных детекторов КЛ, называется форбуш-понижением (ФП). Впервые ФП были обнаружены Forbush [1937] и Hess, Demmelmaier [1937] с использованием ионизационных камер. Более подробная информация о наблюдаемых свойствах ФП приведена в работе [Belov, 2009].

ФП — это реальный идентификатор КВМ. Статистическое исследование Richardson, Cane [2011] показало, что ФП сопровождали 80 % из 300 событий КВМ. Общепринятой оценки вклада ударного фронта, турбулентного слоя и КВМ в амплитуду ФП нет. Существуют разные оценки вклада МО: а) никакого вклада [Reames et al., 2009]; б) вклад незначителен [Badrudin et al., 1991]; в) вклад равен вкладу турбулентного слоя и КВМ [Richardson, Cane, 2011]. Разница в оценках может быть объяснена большим количеством слабых ФП, изменением амплитуды

ФП отдельных событий и разным количеством событий, проанализированных авторами. Например, Belov et al. [2015] обнаружили, что амплитуда ФП в МО составляла менее 0.5 % в половине из 99 событий, наблюдавшихся в 1996–2009 гг.

В этой работе мы предполагаем, что амплитуда ФП формируется диффузионным и электромагнитным механизмами. Вклад различных механизмов в амплитуду ФП оценивается с использованием результатов анализа выбранных событий. Статья организована следующим образом. В разделе 1 представлены использованные данные и анализ, а также информация о диффузионном, электромагнитном механизмах и недиффузионном распространении частиц при формировании ФП. В разделе 2 оценивается вклад механизмов в амплитуду сильных ФП. В разделе 3 приведены выводы на основе результатов исследования.

1. ДИФФУЗИОННЫЙ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ФП

1.1. Данные и анализ

Мы используем 1-часовые данные параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля: скорость солнечного ветра V [км/с]; долгота общего потока φ_v [градус] (изменяется в положительную/отрицательную сторону от нуля по мере изменения направления потока от оси $-X_{GSE}$ к оси $+Y_{GSE}/-Y_{GSE}$); широта общего потока θ_v [градус] (изменяется в положительную/отрицательную сторону от нуля по мере изменения направления потока от положения в плоскости $X_{GSE}-Y_{GSE}$ к оси $+Z_{GSE}/-Z_{GSE}$); компоненты магнитного поля B_x, B_y, B_z [нТл] в системе координат GSE и модуль напряженности магнитного поля $|B|$ [нТл]; среднеквадратичное отклонение вектора напряженности магнитного поля σB [нТл] [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>].

В анализе используется напряженность электрического поля E [мВ/м], абсолютное значение которого вычисляется из его составляющих E_x, E_y, E_z [мВ/м]. Компоненты, в свою очередь, определяются векторным произведением скорости потока и напряженности магнитного поля $\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}$. Декартовы компоненты вектора потока в координатах GSE могут быть получены из скорости и углов как $V_x = -V \cos(\theta_v) \cos(\varphi_v)$, $V_y = +V \cos(\theta_v) \sin(\varphi_v)$, $V_z = +V \sin(\theta_v)$, угол потока φ_v OMNI противоположен углу GSE φ_v .

Мы также используем 1-часовые данные по плотности КЛ Δn [%], полученные группой исследователей космических лучей ИЗМИРАН [<http://space.weather.izmiran.ru/eng/dbs.html>] с использованием метода глобальной съемки [Belov et al., 2018]. Метод

наложенных эпох использовался для анализа плотности КЛ, скорости солнечного ветра, σB , а также напряженности магнитного и электрического полей. Мы используем два варианта нулевого часа: 1) время прихода ударного фронта МУВ к Земле; 2) время прихода МО к Земле. Длительность события привязана к нулевому часу. Анализируемый интервал составляет 72 ч до и 216 ч после нулевого часа. Времена прихода ударного фронта и МО соответствуют составленному Ричардсоном и Кейн каталогу KBM [<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>].

1.2. Механизмы формирования ФП

КВМ, движущийся в межпланетном пространстве, вызывает изменение интенсивности КЛ. Снижение интенсивности сопровождало 80 % из 300 КВМ, зарегистрированных в 1995–2009 гг.; для 10 % событий изменений не произошло, а в 10 % случаев наблюдалось увеличение [Richardson, Cane, 2011]. Минимальная интенсивность наблюдалась внутри КВМ в 90 % событий. $A_{ФП}$ — это относительное значение максимального понижения интенсивности (в %). Статистический анализ показал, что механизм диффузии вызывает уменьшение интенсивности из-за уменьшения диффузии частиц в турбулентном слое [Lockwood et al., 1991] или из-за перпендикулярной диффузии на внешней границе МО [Cane et al., 1995]. Теоретические определения характеристик ФП (как правило, плотности КЛ) основаны на решениях уравнения переноса частиц в диффузионном приближении для различных скоростей возмущения и коэффициентов диффузии [Крымский и др., 1974], а также при учете дрейфа [Kadokura, Nishida, 1986]. Luo et al. [2017] рассчитали характеристики ФП на основе трехмерной нестационарной модели с учетом угла наклона гелиосферного токового слоя.

Диффузионный механизм также используется при расчете характеристик ФП в МО. Считается, что КЛ заполняют МО путем перпендикулярной диффузии [Cane et al., 1995]. Во всех этих моделях коэффициент диффузии является свободным параметром.

Недиффузионное распространение частиц, управляемых винтовым полем, стало рассматриваться недавно. Krittinatham, Ruffolo [2009] рассчитали скорости дрейфа частиц из-за кривизны и градиента магнитного поля в винтовом поле. Они обнаружили, что КЛ могут удерживаться в ловушке длительное время. Дрейфы должны сопровождаться формированием однонаправленной анизотропии с направлением, определяемым пологидальным полем. Для события 13 апреля 2013 г. Tortermun et al. [2018] установили, что внутри замкнутого винтового поля наблюдался сильный однонаправленный поток, как и предсказывала их модель.

Benella et al. [2020] исследовали роль, которую играет магнитная структура МО в формировании ФП. Они оценили амплитуду ФП и его временной профиль в МО, полученный путем реконструкции геометрии магнитного поля методом Града—Шафранова и расчетов траекторий частиц. Модельные расчеты позволяют изучить влияние МО на распространение КЛ. Сравнение результатов моделирования с наблю-

дениями выявило важную роль дрейфов в формировании ФП и небольшой вклад диффузии КЛ.

Laitinen, Dalla [2021] изучили переход КЛ из открытого межпланетного магнитного поля в область, заполненную изолированными силовыми линиями. Они обнаружили, что КЛ могут проникать через область X-точки между изолированными и открытыми линиями магнитного поля. Переход осуществляется быстро и согласуется с простой моделью радиальной диффузии, в которой частицы входят через границу изолированного магнитного поля.

Petukhova et al. [2019] предложили электромагнитный механизм формирования ФП в МО. Механизм состоит из двух процессов: а) потери энергии КЛ в индукционном электрическом поле движущегося МО; б) накопление потерь энергии КЛ из-за квазизахвата в спиральном магнитном поле. Функция распределения КЛ и ее три момента (плотность КЛ, векторная и тензорная анизотропии) определяются решением кинетического уравнения Больцмана без рассеяния частиц. Соотношения между функцией распределения и ее тремя моментами, используемые для сравнения результатов расчета с измерениями, получены Petukhova et al. [2019]. Структура магнитного поля в МО задается в начальный момент в виде тора, а потом со временем меняется согласно условию вмороженности [Петухова, Петухов, 2019]. Было установлено, что характеристики ФП зависят от следующих параметров МО:

- напряженности магнитного поля и его спиральной структуры; напряженности электрического поля; скорости и градиента скорости потока плазмы; магнитной конфигурации (типа МО согласно [Bothmer, Schwenn, 1998]);
- геометрических размеров (угловой ширины по долготе и размера поперечного сечения);
- траектории пересечения Землей МО.

Сравнение результатов расчета с измерениями для двух событий показывает [Petukhova et al., 2020]:

- а) количественное соответствие амплитуд ФП;
- б) плотность КЛ описывается параболической функцией, зависящей от расстояния до центра МО;
- в) векторная анизотропия резко изменяется при пересечении границы МО (она выше в МО);
- г) северо-южная составляющая векторной анизотропии меняет знак вблизи центра МО;
- д) эллиптическая составляющая анизотропии вращается в МО.

Вышеупомянутая модель характеристик ФП, сформированных электромагнитным механизмом, в целом соответствует наблюдаемой плотности и векторной анизотропии КЛ [Abunin et al., 2013; Belov et al., 2015]. Показано, что амплитуда ФП не зависит от типа МО, тогда как вектор анизотропии сильно зависит от него. В представленной модели формирования ФП в МО нет свободных параметров.

2. МЕТОД НАЛОЖЕННЫХ ЭПОХ

Амплитуда ФП состоит из двух частей. Одна часть ($A_{ДМ}$) формируется в турбулентном слое и в части КВМ, предшествующей МО, с помощью диффузионного механизма (ДМ); вторая часть ($A_{ЭМ}$) форми-

руется в МО с помощью электромагнитного механизма (ЭМ): $A_{DM} + A_{EM} = A_{ФП}$. Соотношение этих двух частей определяет относительный вклад механизмов ФП. Мы используем метод наложенных эпох для анализа 1-часовых данных о плотности КЛ, скорости солнечного ветра, напряженности магнитного и электрического полей, σB . Граница МО разделяет области механизмов формирования ФП, поэтому мы используем время пересечения Землей границы МО как нулевой час. Мы проводим анализ только для сильных ФП. Для выбранных событий использованы следующие критерии: $A_{ФП} > 5\%$; есть ударная волна, КВМ с МО; параметры солнечного ветра и данные о магнитном поле доступны в базе данных OMNI; время начала возмущения, границы КВМ и МО доступны в каталоге КВМ; Характеристики КЛ доступны в базе данных, полученной группой исследователей космических лучей ИЗМИРАН.

В соответствии с вышеперечисленными критериями мы выявили 23 ФП за период 1996–2006 гг. Событие 22 июля 2004 г. было исключено из анализа, поскольку передний край МО был зарегистрирован до КВМ. Список событий приведен в таблице. Даты событий взяты из каталога, составленного Ричардсоном и Кейн. Время начала совпадает с внезапным началом геомагнитной бури (обычно связано с приходом ударного фронта на Землю). Пробелы в данных OMNI были заполнены линейно интерполированными значениями. При анализе мы ограничились событиями, зарегистрированными в 23-м солнечном цикле, так как для них определены границы МО в каталоге Ричардсона и Кейн. Была попытка расширить выборку событиями 24-го солнечного цикла, но для них в этом каталоге границ МО не указано. От использования аналогичного каталога WIND пришлось отказаться, поскольку время регистрации границ магнитного препятствия (magnetic obstacle), указанное там, не согласуется с данными каталога Ричардсона и Кейн. Возможно, времена, указанные в каталоге WIND, соответствуют границам КВМ, а не МО.

На верхней панели рис. 1 показана средняя амплитуда сильного ФП ($A_{ФП} = 7\%$), которая состоит из двух частей, формируемых ДМ и ЭМ соответственно: $A_{DM} = 0.5A_{ФП} = 3.5\%$ и $A_{EM} = 0.5A_{ФП} = 3.5\%$.

Сильные ФП можно разделить на две группы в зависимости от соотношения величин A_{DM} и A_{EM} . На рис. 2 представлена динамика плотности КЛ, полу-

Сильные ФП 1996–2006 гг.

№	1-я группа	2-я группа
1	13.07.2000	01.05.1998
2	15.07.2000	24.09.1998
3	28.10.2000	08.11.1998
4	06.11.2000	18.02.1999
5	04.04.2001	11.04.2001
6	29.10.2003	28.04.2001
7	20.11.2003	24.11.2001
8	26.07.2004	18.03.2002
9	09.11.2004	17.04.2002
10	15.05.2005	23.05.2002
11		24.07.2004
12		07.11.2004
13		14.12.2006

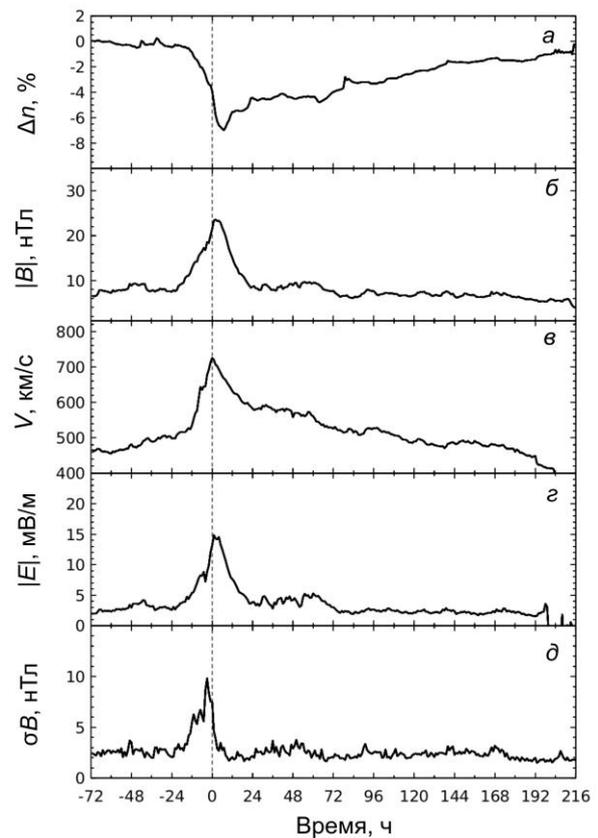


Рис. 1. Средние значения параметров КЛ и солнечного ветра: плотности КЛ (а); модуля магнитного поля (б); скорости солнечного ветра (в); модуля электрического поля (г); стандартного отклонения вектора магнитного поля (д). Нулевой час соответствует времени пересечения Землей границы МО

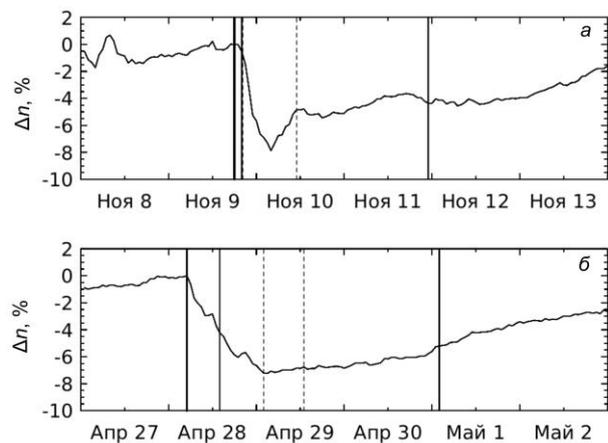


Рис. 2. Зависимость плотности КЛ от времени для событий 9 ноября 2004 г. (а) и 28 апреля 2001 г. (б). Вертикальными линиями показаны: толстой — фронт ударной волны; тонкими — границы КВМ; штриховыми — границы МО

ченная методом глобальной съемки, разработанным в ИЗМИРАН, в двух событиях. Вертикальными линиями отмечены ударный фронт (толстая линия), границы КВМ (тонкие линии) и границы МО (штриховые линии). Этот рисунок иллюстрирует, как события распределялись по группам. На рис. 2, а (событие 9 ноября 2004 г.) в турбулентном слое плотность КЛ уменьшается на 1%, а в МО на 7% ($A_{EM} > A_{DM}$), следовательно, это событие относим к 1-й

группе. На рис. 2, б (событие 28 апреля 2001 г.) в турбулентной области плотность КЛ снижается на 7.2 %, а в МО на 0.1 % ($A_{ЭМ} < A_{ДМ}$), соответственно, это событие относим ко 2-й группе.

В таблице представлен список сильных ФП за 1996–2006 гг., разделенных на две группы: в 1-й группе насчитывается 10 ФП, а во 2-й группе — 13.

На рис. 3, 4 показаны результаты анализа двух групп сильных ФП, полученные методом наложенных эпох с двумя вариантами нулевого времени. Представлены пространственные распределения относительной плотности КЛ и параметров солнечного ветра, когда в качестве нулевого часа используются времена прихода к Земле ударного фронта МУВ (рис. 3) и МО (рис. 4). Красные, зеленые и черные линии представляют параметры 1-й, 2-й группы и всех событий соответственно. Вертикальной штриховой линией отмечен нулевой час.

Как видно на рис. 3, б–д, пространственные распределения параметров солнечного ветра относительно ударного фронта подобны, при этом максимальные значения параметров в событиях 1-й группы больше. Турбулентность магнитного поля, представленная параметром σB , в событиях обеих групп совпадает как по пространственному распределению, так и по величине σB_{max} (рис. 3, д). Рисунок 3, а показывает, что время восстановления ФП 2-й группы заметно больше. Известно, что в спорадических ФП наблюдается восточно-западная асимметрия: амплитуды и времена восстановления восточных ФП больше, чем в западных ФП. С учетом этого можно

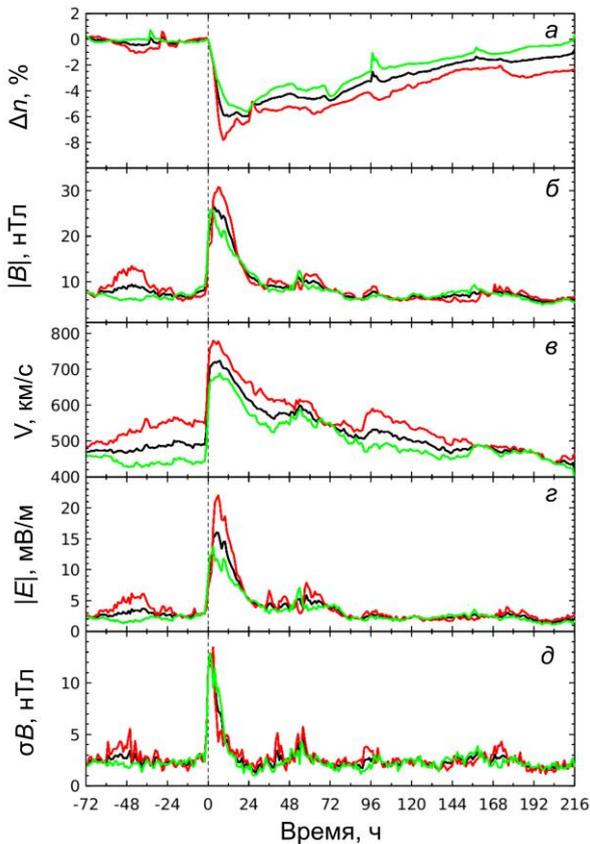


Рис. 3. То же, что на рис. 1, для событий 1-й (красные кривые) и 2-й (зеленые кривые) групп и всех событий (черные кривые). Нулевой час (вертикальные штрихи) соответствует приходу фронта МУВ к Земле

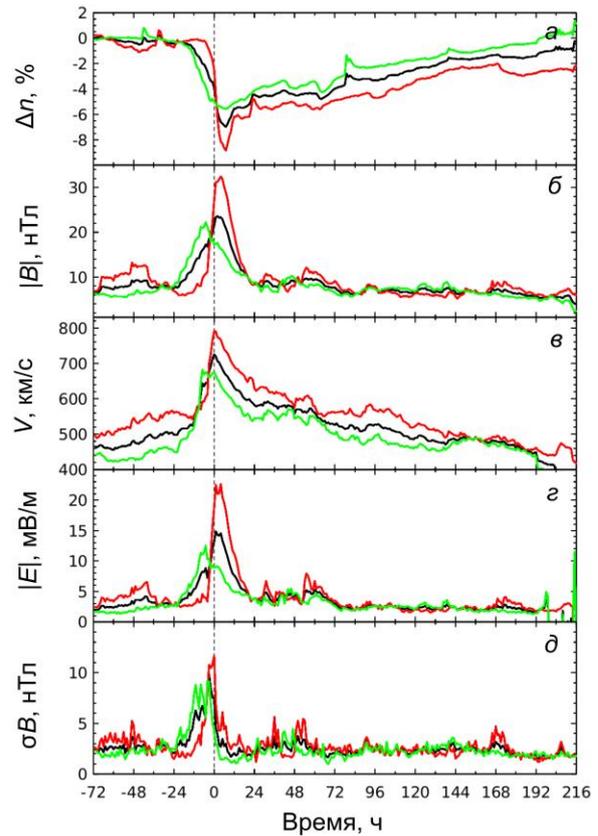


Рис. 4. То же, что на рис. 3. Нулевой час соответствует приходу МО к Земле

полагать, что ФП 1-й и 2-й групп сформированы при пересечении Землей лобовой и восточной частей КВМ соответственно. ФП, образовавшиеся при пересечении западной части КВМ, в выборке отсутствуют, поскольку они не удовлетворяют критерию отбора $A_{ФП} > 5\%$.

Рисунок 4, б–д иллюстрирует различие в группах пространственных распределений параметров солнечного ветра и их максимальных значений относительно передней границы МО. Рисунки показывают, что промежуток времени (размер области) между началом возмущения (ударным фронтом) и передней границей МО в событиях 2-й группы больше. Из рис. 4, д видно, что пространственное распределение и уровень магнитной турбулентности в группах различаются. Пространственное распределение плотности КЛ в области перед границей МО в группах (рис. 4, а) соответствует распределению турбулентности (рис. 4, д).

Рисунок 4, а показывает разницу амплитуд ФП в группах 1 и 2: $A_{ФП1} = 8.5\%$ и $A_{ФП2} = 5.7\%$. Сильно различаются вклады механизмов в группах: $A_{ДМ1} = 0.26A_{ФП1} = 2.2\%$, $A_{ЭМ1} = 0.74A_{ФП1} = 6.3\%$; $A_{ДМ2} = 0.79A_{ФП2} = 4.5\%$, $A_{ЭМ2} = 0.21A_{ФП2} = 1.2\%$. Формирование двух групп сильных ФП, различающихся пространственным распределением параметров солнечного ветра, максимальными значениями параметров, временем восстановления понижений и вкладами механизмов в амплитуду ФП, является следствием наблюдаемой восточно-западной асимметрии ФП. Асимметрия объясняется разницей вкладов электромагнитного и диффузионного механизмов в амплитуду ФП в разных областях КВМ. Диффузион-

ный механизм производит вклад во всех событиях выборки, поскольку во всех событиях присутствует ударный фронт и, соответственно, турбулентный слой. Электромагнитный механизм дает вклад только в лобовой части КВМ (1-я группа). Неэффективность ЭМ в периферийной части МО (2-я группа) может объясняться отсутствием винтового магнитного поля [Owens, 2016] — причины квазизахвата частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При формировании спорадических ФП действуют диффузионный и электромагнитный механизмы. Диффузионный механизм действует за пределами магнитного облака, там, где наблюдается повышенный уровень турбулентности магнитного поля. Электромагнитный механизм действует в области винтового магнитного поля МО.

Результаты анализа сильных ФП, зарегистрированных в 1996–2006 гг. и удовлетворяющих принятым критериям отбора, показывают: средняя амплитуда ФП составляет 7 %, вклады диффузионного и электромагнитного механизмов совпадают: $A_{DM}=0.5A_{ФП}=3.5\%$ и $A_{ЭМ}=0.5A_{ФП}=3.5\%$.

Сильные ФП можно разделить на две группы в зависимости от соотношения вкладов диффузионного и электромагнитного механизма: $A_{ЭМ}>A_{DM}$ в группе 1 и $A_{ЭМ}<A_{DM}$ в группе 2. Первая группа включает наиболее сильные ФП, образованные диффузионным и электромагнитным механизмами. Средняя амплитуда ФП — $A_{ФП1}=8.5\%$, включая вклады диффузионного механизма $A_{DM1}=0.26A_{ФП1}=2.2\%$ и электромагнитного механизма $A_{ЭМ1}=0.74A_{ФП1}=6.3\%$. Средняя амплитуда ФП во 2-й группе $A_{ФП2}=5.7\%$, включая вклады диффузионного механизма $A_{DM2}=0.79A_{ФП2}=4.5\%$ и электромагнитного механизма $A_{ЭМ2}=0.21A_{ФП2}=1.2\%$.

Образование двух групп ФП может происходить в результате лобового и периферийного пересечения Землей КВМ и быть обусловлено неэффективностью электромагнитного механизма из-за отсутствия винтового магнитного поля.

Работа проводится при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект FWRS-2021-0012). Авторы выражают признательность сотрудникам ИЗМИРАН за предоставленную базу данных ФП [<http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html>], а также благодарят создателей баз данных OmniWeb [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>] и NMDB [<https://www.nmdb.eu>] за предоставление данных и И.Г. Ричардсона и Х.В. Кейн за составление каталога по околоземным межпланетным КВМ [<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Крымский Г.Ф., Транский И.А., Елшин В.К. Поршневые ударные волны в межпланетной среде и форбуш-эффекты. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1974. Т. 14, № 3. С. 407–410.

Петухова А.С., Петухов С.И. Тороидальные модели магнитного поля с винтовой структурой. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 2. С. 74–81. DOI: [10.12737/szf-52201910](https://doi.org/10.12737/szf-52201910).

Abunin A., Abunina M., Belov A., et al. The impact of magnetic clouds on the density and the first harmonic of the cosmic ray anisotropy. *ICRC*. 2013. Vol. 33. 1618.

Badruddin B., Venkatesan D., Zhu B.Y. Study and effect of magnetic clouds on the transient modulation of cosmic-ray intensity. *Solar Phys*. 1991. Vol. 134, no. 1. P. 203–209. DOI: [10.1007/BF00148748](https://doi.org/10.1007/BF00148748).

Belov A.V. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena. *Universal Heliophysical Processes*. 2009. Vol. 4. P. 439–450. DOI: [10.1017/S1743921309029676](https://doi.org/10.1017/S1743921309029676).

Belov A., Abunin A., Abunina M., et al. Coronal Mass Ejections and Non-recurrent Forbush Decreases. *Solar Phys*. 2014. Vol. 289, no. 10. P. 3949–3960. DOI: [10.1007/s11207-014-0534-6](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0534-6).

Belov A., Abunin A., Abunina M., et al. galactic cosmic ray density variations in magnetic clouds. *Solar Phys*. 2015. Vol. 290, no. 5. P. 1429–1444. DOI: [10.1007/s11207-015-0678-z](https://doi.org/10.1007/s11207-015-0678-z).

Belov A., Eroshenko E., Yanke V., et al. The global survey method applied to ground-level cosmic ray measurements. *Solar Phys*. 2018. Vol. 293, no. 4, 68. DOI: [10.1007/s11207-018-1277-6](https://doi.org/10.1007/s11207-018-1277-6).

Benella S., Laurenza M., Vainio R., et al. A new method to model magnetic cloud-driven Forbush decreases: The 2016 August 2 event. *Astrophys. J*. 2020. Vol. 901, no. 1. 21. DOI: [10.3847/1538-4357/abac59](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abac59).

Bothmer V., Schwenn R. The structure and origin of magnetic clouds in the solar wind. *Ann. Geophys*. 1998. Vol. 16, no. 1. P. 1–24. DOI: [10.1007/s00585-997-0001-x](https://doi.org/10.1007/s00585-997-0001-x).

Cane H.V., Richardson I.G., Wibberenz G. The response of energetic particles to the presence of ejecta material. *International Cosmic Ray Conference*. 1995. Vol. 4. P. 377.

Forbush S.E. On the effects in cosmic-ray intensity observed during the recent magnetic storm. *Physical Review*. 1937. Vol. 51, no. 12. P. 1108–1109. DOI: [10.1103/PhysRev.51.1108.3](https://doi.org/10.1103/PhysRev.51.1108.3).

Hess V.F., Demmelmair A. World-wide effect in cosmic ray intensity, as observed during a recent magnetic storm. *Nature*. 1937. Vol. 140, no. 3538. P. 316–317. DOI: [10.1038/140316a0](https://doi.org/10.1038/140316a0).

Kadokura A., Nishida A. Two-dimensional numerical modeling of the cosmic ray storm. *J. Geophys. Res*. 1986. Vol. 91, no. A1. P. 13–30. DOI: [10.1029/JA091iA01p00013](https://doi.org/10.1029/JA091iA01p00013).

Kilpua E., Koskinen H E.J., Pulkkinen T.I. Coronal mass ejections and their sheath regions in interplanetary space. *Living Reviews in Solar Physics*. 2017. Vol. 14, no. 1. 5. DOI: [10.1007/s41116-017-0009-6](https://doi.org/10.1007/s41116-017-0009-6).

Krittinatham W., Ruffolo D. Drift orbits of energetic particles in an interplanetary magnetic flux rope. *Astrophys. J*. 2009. Vol. 704, no. 1. P. 831–841. DOI: [10.1088/0004-637X/704/1/831](https://doi.org/10.1088/0004-637X/704/1/831).

Laitinen T., Dalla S. Cosmic ray access from external field lines to an ICME fluxrope. *43rd COSPAR Scientific Assembly. Held 28 January – 4 February*. 2021. Vol. 43, 866.

Lockwood J.A., Webber W.R., Debrunner H. Forbush decreases and interplanetary magnetic field disturbances: Association with magnetic clouds. *J. Geophys. Res*. 1991. Vol. 96, no. A7. P. 11587–11604. DOI: [10.1029/91JA01012](https://doi.org/10.1029/91JA01012).

Luo X., Potgieter M.S., Zhang M., Feng X. A numerical study of Forbush decreases with a 3D cosmic-ray modulation model based on an SDE approach. *Astrophys. J*. 2017. Vol. 839, no. 1. 53. DOI: [10.3847/1538-4357/aa6974](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa6974).

Owens M.J. Do the legs of magnetic clouds contain twisted flux-rope magnetic fields? *Astrophys. J*. 2016. Vol. 818, no. 2, P. 1–5. DOI: [10.3847/0004-637X/818/2/197](https://doi.org/10.3847/0004-637X/818/2/197).

Petukhova A.S., Petukhov I.S., Petukhov S.I. Theory of the formation of Forbush decrease in a magnetic cloud: Dependence of Forbush decrease characteristics on magnetic cloud parameters. *Astrophys. J*. 2019. Vol. 880, no. 1, 17. DOI: [10.3847/1538-4357/ab2889](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab2889).

Petukhova A.S., Petukhov I.S., Petukhov S.I. Forbush decrease characteristics in a magnetic cloud. *Space Weather*. 2020. Vol. 18, no. 12, e02616. DOI: [10.1029/2020SW002616](https://doi.org/10.1029/2020SW002616).

Reames D.V., Kahler S.W., Tylka A.J. Anomalous cosmic rays as probes of magnetic clouds. *Astrophys. J.* 2009. Vol. 700, no. 2. P. L196–L199. DOI: [10.1088/0004-637X/700/2/L196](https://doi.org/10.1088/0004-637X/700/2/L196).

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, no. 2. P. 609–627. DOI: [10.1007/s11207-011-9774-x](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9774-x).

Tortempun U., Ruffolo D., Bieber J.W. Galactic cosmic-ray anisotropy during the Forbush decrease starting 2013 April 13. *Astrophys. J.* 2018. Vol. 852, no. 2. L26. DOI: [10.3847/2041-8213/aaa407](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaa407).

URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> (дата обращения 1 марта 2023 г.).

URL: <http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html> (дата обращения 1 марта 2023 г.).

URL: <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm> (дата обращения 1 марта 2023 г.).

URL: <https://www.nmdb.eu> (дата обращения 1 марта 2023 г.).

Статья подготовлена по материалам Восемнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 6–10 февраля 2023 г., ИКИ РАН, Москва.

Как цитировать эту статью:

Петухова А.С., Петухов И.С., Петухов С.И., Готовцев И.С. Особенности динамики параметров среды и плотности космических лучей в сильных форбуш-понижениях, связанных с магнитными облаками. *Солнечно-земная физика.* 2023. Т. 9, № 2. С. 94–100. DOI: [10.12737/szf-92202311](https://doi.org/10.12737/szf-92202311).