

УДК 524.1-352

ФОРБУШ-ЭФФЕКТЫ С ВНЕЗАПНЫМ И ПОСТЕПЕННЫМ НАЧАЛОМ

© 2012 г. А. А. Абунин, М. А. Абунина, А. В. Белов,
Е. А. Ерошенко, В. А. Оленева, В. Г. Янке

ФГБУ науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, г. Троицк (Московская обл.)

e-mail: abunin@izmiran.ru

Поступила в редакцию 13.09.2011 г.

Для всестороннего изучения Форбуш-эффектов и их связи с солнечной и геомагнитной активностью создана база транзитных явлений в космических лучах и межпланетной среде, которая непрерывно пополняется данными о новых событиях. На основе этих данных исследуются зависимости величины Форбуш-эффектов от различных внутренних и внешних характеристик, а также выделены различные группы событий. В работе рассмотрены рекуррентные (вызванные потоками высокоскоростного солнечного ветра из корональных дыр) и спорадические (связанные с корональными выбросами масс) события. Исследованы группы событий с внезапным и постепенным началом. Показано, что полученные связи (зависимость величины Форбуш-эффектов от параметров межпланетных возмущений, индексов геомагнитной активности и т.д.) существенно различаются для выделенных групп. Наиболее вероятно, что эти различия обусловлены различными источниками возмущений солнечного ветра.

1. ВВЕДЕНИЕ

Форбуш-эффект (ФЭ), или Форбуш-понижение (ФП), – это изменения плотности и анизотропии космических лучей (КЛ) в крупномасштабных возмущениях солнечного ветра (СВ). Этот эффект был открыт С. Форбушем в 1937 г. [Forbush, 1937], и в литературе ему уделено много внимания, к примеру, в книгах Л.И. Дормана [Dogman, 1963, 1974], а также в работах [Lockwood, 1971; Iucci et al., 1979, 1986; Cane, 1993, 2000; Richardson and Cane, 2005; Belov and Ivanov, 1997; Belov et al., 1997; Belov, 2009].

Существуют два основных типа возмущений межпланетной среды: спорадические и рекуррентные [Lockwood, 1971; Cane, 2000; Belov, 2009; Richardson and Cane, 2010]. Первые обусловлены выбросами солнечной массы (СМЕ), вторые – высокоскоростными потоками плазмы (ВСП) из корональных дыр, вращающимися вместе с Солнцем. Оба типа межпланетных возмущений способны вызвать отклик в вариациях КЛ (также как в магнитосфере и ионосфере Земли). Однако механизм дополнительной модуляции КЛ в данных типах возмущений СВ различен [Parker, 1963; Lockwood, 1971; Belov, 2000]. Различаются и характеристики ФЭ двух типов. Но получение количественных данных о различиях этих характеристик затруднительно, поскольку далеко не всегда известно, что является источником конкретного события и к какому типу оно относится. Более того, многие события имеют смешанную природу, и в их создании участвуют и СМЕ, и корональные дыры [Иванов, 1996].

Поскольку прямой путь в статистическом сравнительном анализе ФЭ двух типов затруднен, приходится искать косвенные подходы. Например, делить события по особенностям их начала, объединяя в одну группу события, начавшиеся с прихода к Земле межпланетной ударной волны, а в другую – события без ударной волны, как было впервые предложено еще Китамурой [Kitamura, 1954]. Разумеется, мы не предполагаем, что такое деление полностью соответствует делению по солнечным источникам. Ударные волны у Земли иногда наблюдаются и на фронтах высокоскоростных потоков из корональных дыр. С другой стороны, множество межпланетных возмущений, созданных СМЕ, т.е. ICME (особенно, слабых), приходят без ударной волны. Тем не менее, можно утверждать, что ударные волны более характерны для событий, обусловленных СМЕ, и не типичны для событий, связанных с корональными дырами.

В представленной работе проведен статистический анализ большого количества данных с целью изучения связи различных характеристик ФЭ между собой и с параметрами окружающей среды. Анализ проводился для двух различных групп, объединяющих события, которые начались с приходом к Земле межпланетной ударной волны (группа S) и события с постепенным началом, не сопровождавшиеся ни SSC, ни ударной волной (группа NS).

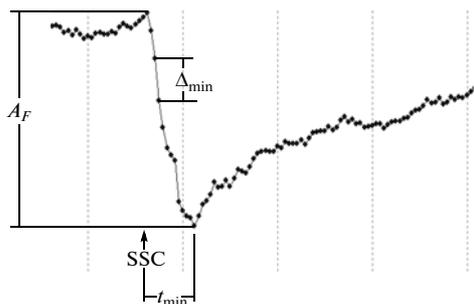


Рис. 1. Типичное поведение плотности КЛ в Форбуш-эффекте.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Вариации плотности и анизотропии космических лучей объединены с солнечными, межпланетными и геомагнитными характеристиками в специально созданной сотрудниками ИЗМИРАН базе данных межпланетных возмущений и Форбуш-эффектов [Belov et al., 1999; 2001]. Космические лучи представлены результатами глобальной съемки по данным всей мировой сети нейтронных мониторов (GSM) для жесткости 10 ГВ, а информация по солнечному ветру взята из базы данных OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>). База данных включает в себя большое количество различных характеристик по ~6000 ФЭ, охватывающих более чем полувековой период наблюдений (1957–2010 гг.).

На рисунке 1 показаны некоторые из характеристик ФЭ: A_F — величина ФЭ (максимальная вариация плотности КЛ для 10 ГВ); Δ_{\min} — максимальное уменьшение плотности КЛ за 1 ч в данном событии, т. е. максимальный декремент; t_{\min} — полное время основной фазы ФЭ, т. е. время, прошедшее между началом события (совпавшего с SSC в данном случае) и моментом максимального понижения плотности КЛ.

Представленная база данных не только содержит информацию о различных характеристиках ФЭ и межпланетных возмущений, но и является удобным инструментом для ее обработки. Она позволяет делать различные выборки событий для определения взаимосвязей между различными параметрами, представляя запрашиваемую информацию как в числовой, так и в графической форме, что было использовано для получения результатов данной работы.

К сожалению, не все события, собранные в базе данных, одинаково пригодны для статистического анализа. К примеру, если два или более возмущения солнечного ветра следуют друг за другом без достаточного перерыва, то первый ФЭ не успевает развиваться, а второй развивается под влиянием не одного, а двух возмущений. Чтобы избежать таких взаимовлияний, мы выбирали те собы-

тия, начало которых было отделено от соседних ФЭ на 60 ч как минимум. При этом, поскольку влияние небольших понижений, как правило, незначительно, мы оставляли в выборке те события, которым предшествовали ФЭ, не превышавшие 1.5%. Оставшиеся события были поделены на две группы: группа S (с межпланетными ударными волнами) и группа NS (без ударных волн). Внезапное начало магнитных бурь использовалось как наиболее удобный индикатор межпланетных ударных волн (ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/stp/solar_data/sudden_commencements/). В S-группу не были включены слабо выраженные и ненадежно выделенные из внезапных начал — те, которые ни одной магнитной обсерваторией не были отнесены к классу А [Mayaud and Romana, 1977]. В некоторых случаях в S-группу включались события, в которых SSC отсутствовали, но были сообщения об ударных волнах, наблюдавшихся на спутниках ACE (<http://www.swpc.noaa.gov/ace/>), Wind (http://lepfi.gsfc.nasa.gov/mfi/mag_cloud_pub1.html) и Soho (<http://lascowwww.nrl.navy.mil/>). В S-группу вошло всего 536 событий, в NS-группу — 2432.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как отмечалось выше, используя базу данных межпланетных возмущений и Форбуш-эффектов можно получить информацию о различных параметрах в выделенных группах. В таблице представлены средние, максимальные и минимальные значения величин параметров ФЭ и межпланетных возмущений для S- и NS-групп:

A_F — величина Форбуш-эффекта; $A_{xy_{\max}}$, A_z — максимальные величины составляющих анизотропии в плоскости земного экватора и вдоль оси вращения Земли, Δ_{\min} — максимальное часовое понижение плотности космических лучей; Kp_{\max} , Ap_{\max} , Dst_{\min} — максимальные значения индексов геомагнитной активности в данном возмущении; B_{\max} — максимальная величина напряженности ММП; V_{\max} — максимальная скорость солнечного ветра; $V_m B_m$ — параметр, характеризующий возмущенность солнечного ветра и нормированный следующим образом

$$V_m B_m = \frac{V_{\max} B_{\max}}{V_0 B_0}, \quad (1)$$

где V_0 и B_0 параметры невозмущенной межпланетной среды (обычно используются $V_0 = 400$ км/с, а $B_0 = 5$ нТл); $t(V_{\max})$, $t(B_{\max})$, $t(A_{xy_{\max}})$, $t(\Delta_{\min})$ — время от начала возмущения до максимального значения скорости солнечного ветра, напряженности ММП, составляющей анизотропии A_{xy} , и часового падения плотности Δ_{\min} соответственно; R_B — максимальная жесткость частиц, которые способны отразить магнитное поле межпланетного возмущения (см. объяснения далее); t_{\min} — время

Характеристики Форбуш-эффектов для S- и NS-групп

Характеристика	S- группа				NS- группа			
	Средние величины	Мах максимум	Min минимум	Кол-во событий	Средние величины	Мах максимум	Min минимум	Кол-во событий
$A_F, \%$	2.56 ± 0.10	20.40	0.30	536	1.15 ± 0.02	11.00	0.10	2432
$A_{xy_{max}}, \%$	1.73 ± 0.04	9.67	0.32	536	1.22 ± 0.01	4.85	0.13	2432
$A_z, \%$	1.98 ± 0.04	10.18	0.53	536	1.40 ± 0.01	5.60	0.54	2429
$\Delta_{min}, \%$	-0.61 ± 0.02	-0.13	-5.15	536	-0.32 ± 0.00	-0.09	-3.67	2432
Kp_{max}	5.41 ± 0.06	9.00	2.00	536	4.18 ± 0.02	8.67	1.00	2432
$Ap_{max}, 2\text{нТл}$	74.46 ± 2.65	400.00	7.00	536	36.09 ± 0.55	300.00	4.00	2432
$Dst_{min}, \text{нТл}$	-66.9 ± 2.3	4.0	-330.0	514	-35.5 ± 0.5	9.0	-327.0	2345
$B_{max}, \text{нТл}$	16.69 ± 0.39	65.60	4.90	361	10.81 ± 0.09	33.20	4.10	1748
$V_{max}, \text{км.с}$	559.9 ± 6.3	950.0	337.0	354	523.4 ± 2.8	874.0	296.0	1725
$V_m B_m$	4.91 ± 0.17	23.91	1.24	324	2.90 ± 0.03	11.14	0.76	1618
$t(V_{max}), \text{ч}$	24.30 ± 1.10	71.00	-12.00	354	25.88 ± 0.55	80.00	-13.00	1725
$t(B_{max}), \text{ч}$	10.33 ± 0.71	76.00	-13.00	361	17.92 ± 0.46	75.00	-13.00	1748
$t(A_{xy_{max}}), \text{ч}$	18.87 ± 0.84	71.00	-13.00	536	25.46 ± 0.48	71.00	-13.00	2432
$R_B, \text{ГВ}$	39.35 ± 3.48	266.77	0.00	189	9.91 ± 0.60	172.46	0.00	1211
$t_{min}, \text{ч}$	20.86 ± 0.71	126.00	-13.00	536	22.48 ± 0.50	116.00	-13.00	2264
$t(\Delta_{min}), \text{ч}$	11.95 ± 0.59	62.00	-17.00	536	18.79 ± 0.39	93.00	-31.00	2264
$A_F/B_m, \%/ \text{нТл}$	0.159 ± 0.007	1.26	0.02	344	0.109 ± 0.001	0.60	0.02	1634

от начала события до минимума плотности космических лучей; A_F/B_{max} – отношение величины ФЭ к максимальному значению напряженности ММП. Анализируя таблицу, можно отметить, что значения большинства параметров в различных группах существенно отличаются, например, средняя величина ФЭ в S-группе практически в два раза больше, чем в группе NS ($2.27 \pm 0.08\%$ и $1.12 \pm 0.01\%$ соответственно). То, что в событиях, которые начались с приходом межпланетных ударных волн, величины ФЭ существенно больше, чем в группе без ударных волн подтверждает распределение величин ФЭ (рис. 2).

Из рисунка 2 видно, что максимум числа событий группы NS, является более узким и смещен относительно максимума S-группы влево, в область меньших амплитуд ФЭ. Если посмотреть, сколько ФЭ с $A_F < 1\%$ приходится на данные группы, то окажется, что для NS-группы их будет 1218 (около половины) событий, а для S-группы всего 88 (~1/6 часть). Если выбрать события с $A_F < 2\%$, то в NS-группе окажется 2172 события (почти 90% от всех), а в S-группе – 297 (~55%). Если обратиться к верхней части распределения с большими величинами ФЭ, то рис. 2 показывает большее количественное преобладание S-группы в данной области. ФЭ с $A_F > 6\%$ в NS-группе составляют ~1/400 часть, а в S-группе 1/12 часть собы-

тий данной группы, т. е. большие по величине события принадлежат, в основном, S-группе. Максимальные значения ФЭ для S- и NS-групп 20.4% и 11.0% соответственно. При этом следует учесть, что многие события, превышающие по величине данные значения, в основном из S-группы, по вышеописанным причинам были отсеяны, и пре-

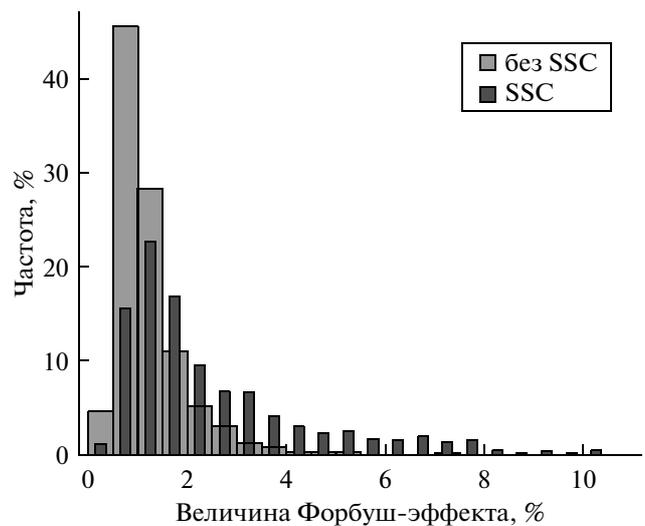


Рис. 2. Распределения величин ФЭ для групп событий с SSC и без SSC.

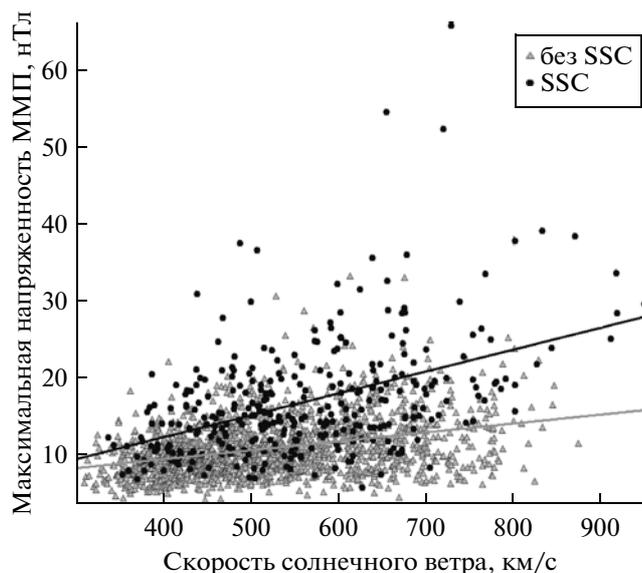


Рис. 3. Зависимость межпланетного магнитного поля от скорости солнечного ветра для каждого ФЭ для групп событий S и NS.

обладание S-группы среди больших ФЭ на деле еще очевиднее. Более того, при более подробном рассмотрении отдельных событий оказывается, что все большие ФЭ полностью или частично связаны с СМЕ.

Может показаться, что отличия S- и NS- групп только в мощности солнечных и межпланетных событий, и они являются разными выборками одного и того же распределения. Понятно, что более мощные возмущения солнечного ветра, будь то ICME или высокоскоростные потоки (ВСП) из корональных дыр, чаще создают ударные волны и сильнее влияют на КЛ. Однако мы постараемся показать, что между группами существуют не только количественные, но и качественные различия, что эти группы представляют разные распределения, а не являются двумя разными выборками одного. Одна из задач данной работы — определить характеристики и свойства данных групп, их сходства и различия, а также выяснить, как в данных группах связаны различные характеристики событий.

Времена достижения минимума в плотности КЛ (t_{\min}) достаточно близки в двух группах (20.9 ± 0.7 ч (S) и 22.5 ± 0.5 ч (NS)), но большинство других параметров существенно различается, например, величина анизотропии галактических космических лучей. Для максимума экваториальной составляющей анизотропии $A_{\text{ху}}_{\max}$ мы имеем $1.73 \pm 0.04\%$ (S) и $1.22 \pm 0.01\%$ (NS).

Различия в величинах ФЭ двух групп становятся понятны, если сравнить параметры соответствующих межпланетных возмущений B_{\max} , V_{\max} , $V_m B_m$ и R_B . Все они больше в S-группе, это

касается и средних, и максимальных величин. К примеру, усредненный параметр $V_m B_m$ различается в ~ 1.7 раза (4.91 ± 0.17 и 2.90 ± 0.03). Но самые большие различия получаются для параметра R_B — оценки максимальной жесткости частиц, которые способны отразить усиление магнитного поля в данном межпланетном возмущении [Dogman, 1963; Belov and Ivanov, 1997]. Мы рассчитали эту величину для каждого события, в котором были достаточно полные измерения солнечного ветра, следующим образом:

$$R_B = \sum_{t=t_0}^{t_{\min}} (B(t) - B_0)V(t), \quad (2)$$

где $B(t)$ и $V(t)$ — напряженность ММП и скорость солнечного ветра, B_0 — постоянное значение напряженности, до которого поле можно считать невозмущенным (здесь выбрано $B_0 = 7$ нТл), а суммирование ведется по часам от начала ФЭ (t_0) до часа минимума плотности КЛ (t_{\min}).

Средние величины R_B для двух групп различаются \sim в 4 раза (39.4 ± 3.5 (S) и 9.9 ± 0.6 (NS)). Естественно, что более выраженные межпланетные возмущения группы S создают большие ФЭ. Это же справедливо и для сопутствующих возмущений магнитного поля Земли. Например, средние значения A_p -индексов для S и NS групп равны 72.3 (что соответствует умеренной магнитной буре) и 34.4 (малая магнитная буря) соответственно.

Анализируя только средние значения параметров для выделяемых групп трудно судить, в чем их различие, является ли оно только количественным или же говорит о разнице в механизмах дополнительной модуляции КЛ. Ответ на эти вопросы скорее дадут сопоставления различных параметров. На рисунке 3 представлена зависимость между максимумом межпланетного магнитного поля B_{\max} и максимумом скорости V_{\max} солнечного ветра для каждого из отобранных событий. Из общих соображений понятно, что они должны коррелировать между собой. Как в случае корональных дыр, так и в случае СМЕ, чем большую скорость имеет поток возмущенного солнечного ветра, тем сильнее он сжимает межпланетное вещество и межпланетное магнитное поле. К тому же для больших СМЕ корреляцию между скоростью выброса солнечного вещества и напряженностью выброшенного магнитного поля можно предполагать уже в солнечном источнике СМЕ. С другой стороны, очевидно, что скорость не является единственным параметром, определяющим возмущение солнечного ветра, в частности, эффективность его взаимодействия с окружающей средой. На это взаимодействие существенно влияет скорость фонового солнечного ветра, гелиосферный токовый слой, ранее созданные межпланетные возмущения и т.п. Важно, что во мно-

гих выбросах (ICME) максимум напряженности ММП часто наблюдается в магнитном облаке [Burlaga et al., 1982] без прямой связи со скоростью ветра, например, большие значения B_{\max} можно видеть в медленных волоконных выбросах. С учетом сказанного, нас не должно удивлять, что корреляция между V_{\max} и B_{\max} для S- и NS-групп существует, но коэффициенты корреляции невелики (0.46 и 0.32 соответственно).

Рисунок 3 может создать впечатление, что события S-группы имеют приблизительно такой же диапазон скоростей, что события группы NS. Но это не совсем так, поскольку по разным причинам (неполные данные по солнечному ветру, наличие нескольких событий, по нашим условиям не рассматриваемых) часть событий с большими скоростями не попали в выборку. К примеру, все события, в которых V_{\max} больше 1000 км/с, связаны с корональными выбросами масс (CME) и обычно начинаются с SSC (т.е. должны принадлежать группе S), но они не попали в данную выборку. Следует также подчеркнуть, что величина скорости CME может достигать нескольких тысяч километров в секунду у Солнца, в то время как скорость потоков плазмы из корональных дыр существенно меньше: даже в самых больших полярных корональных дырах по данным миссии Ulysses [McComas et al., 2001] скорость не выше 900 км/с.

Из рисунка 3 видно, что межпланетные возмущения группы S сильнее, чем в группе NS. Самые слабые (т.е. самые медленные и обладающие самым слабым ММП) возмущения относятся к NS-группе, а самые сильные (быстрые и с большими значениями B_{\max}), напротив, к S-группе. При одинаковых скоростях величина ММП достаточно сильно отличается, и регрессионная прямая для S-группы проходит намного выше, чем для NS-группы. Это означает, что в группе S при тех же скоростях происходят более сильные возмущения в межпланетном пространстве (большее усиление магнитного поля), чем в группе без ударных волн. Тем самым создаются условия для более глубокой модуляции галактических КЛ.

Облако точек S-группы не только расположено выше NS-облака, но и по-другому развернуто, т.е. регрессионные прямые отличаются не только положением, но и наклоном. Сравним количественно параметры регрессий $B_{\max} = a + bV_{\max}$. Для S-группы $b = b_S = 0.027 \pm 0.003$, а для NS-группы $b = b_{NS} = 0.011 \pm 0.001$. Видно, что между коэффициентами b имеется достаточно большое, статистически значимое различие. При увеличении максимальной скорости на 100 км/с максимальная напряженность ММП, в среднем, возрастает на 2.7 нТл в S-группе и только на 1.1 нТл в NS-группе. Таким образом, при росте скорости различие в величинах B_{\max} возрастает. В пользу то-

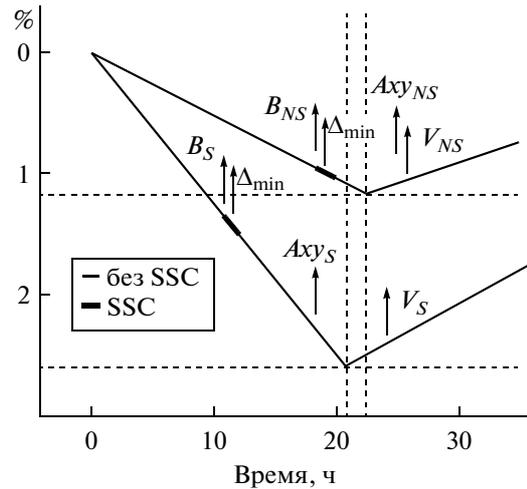


Рис. 4. Схематическое изображение средних Форбуш-понижений в группах S и NS, соответствующее таблице.

го, что межпланетные возмущения двух групп устроены по-разному, говорят и различия во временах максимумов скорости солнечного ветра $t(V_{\max})$ и напряженности ММП $t(B_{\max})$ (см. табл.). Для NS-группы максимумы наступают позже (рис. 4), особенно велика разница для $t(B_{\max})$. Максимум скорости отстает от максимума ММП на 14 ± 1 ч в S-группе, и только на 8 ± 1 ч в NS-группе. Мы видим, что между группами существуют не только количественные, но и качественные различия; следовательно, это, скорее, два разных распределения, чем две части одного и того же. Можно ожидать, что и механизм дополнительной модуляции КЛ в этих группах будет различным. Подтверждение этому можно найти в таблице, в различиях средних величин отношения A_F/B_{\max} (0.159 ± 0.007 и 0.109 ± 0.001), которые говорят о том, что усиление напряженности ММП до одних и тех же величин, приводит к существенно большей модуляции в S-группе.

Об особенностях модуляции КЛ в различных группах событий может рассказать связь величины ФЭ с различными параметрами: как внешними (параметрами межпланетной среды), так и внутренними (характеристиками самих ФЭ). Одним из таких внутренних параметров, помимо величины ФЭ, является параметр Δ_{\min} (рис. 4), показывающий, на сколько процентов в час максимально уменьшается плотность КЛ в данном событии.

Δ_{\min} является частью ФП, и не удивительно, что между Δ_{\min} и A_F в группе S наблюдается хорошая корреляция (коэффициент корреляции $\rho = -0.79$). В группе NS она хуже ($\rho = -0.57$), но и здесь достаточно очевидна. Это, в частности, дает возможность оценивать максимальную вели-

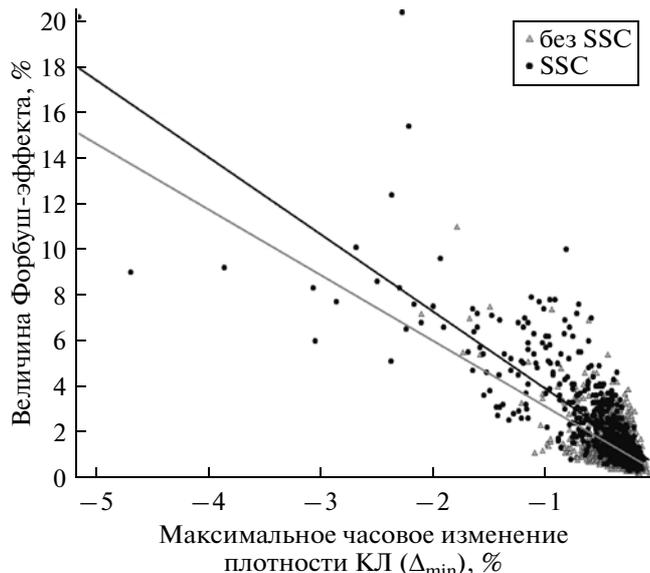


Рис. 5. Зависимость величины ФЭ от максимального часового уменьшения плотности

чину ФЭ еще на фазе спада интенсивности КЛ, при этом оценки будут различными для двух групп. Например, если Δ_{\min} составляет 2%, то для события в S-группе (в соответствии с данными линейной регрессии на рис. 5) можно ожидать величину ФЭ $\sim 7.3\%$, а в группе NS — $\sim 6.1\%$. Заметны также различия во временном развитии эффектов различных групп (рис. 4 и табл.). Понижение КЛ в S-группе развивается быстрее, и его минимум (более глубокий) достигается несколько раньше, чем в NS-группе. Сильнее чем времена t_{\min} различаются времена $t(\Delta_{\min})$. Минимум Форбуш-понижения в S-группе наступает в среднем через 8.9 ± 0.9 ч после $t(\Delta_{\min})$, а в NS-группе различие времен существенно меньше — 3.7 ± 0.7 ч. Кроме различий следует отметить и важное сходство двух групп: в обеих группах наибольший спад плотности ($t(\Delta_{\min})$) наблюдается сразу же после максимума напряженности ММП ($t(B_{\max})$).

Часть внутренних параметров ФЭ описывает анизотропию КЛ. На рисунке 6 представлена зависимость вариации плотности A_F от величины экваториальной составляющей $A_{\text{ху},\text{max}}$ анизотропии галактических космических лучей.

Регрессионные прямые для двух групп в данном случае почти совпадают. Однако это не означает, что анизотропия КЛ в разных группах ведет себя одинаковым образом. Скорее всего, она различна, но для выявления этих различий требуется более детальный анализ и более тонкие методы. В пользу этого предположения говорит сравнение времен достижения максимальных величин $A_{\text{ху},\text{max}}$ в двух группах (табл. , рис. 4). В S-группе $t(A_{\text{ху},\text{max}}) = 18.9 \pm 0.8$ ч, а в NS-группе $t(A_{\text{ху},\text{max}}) =$

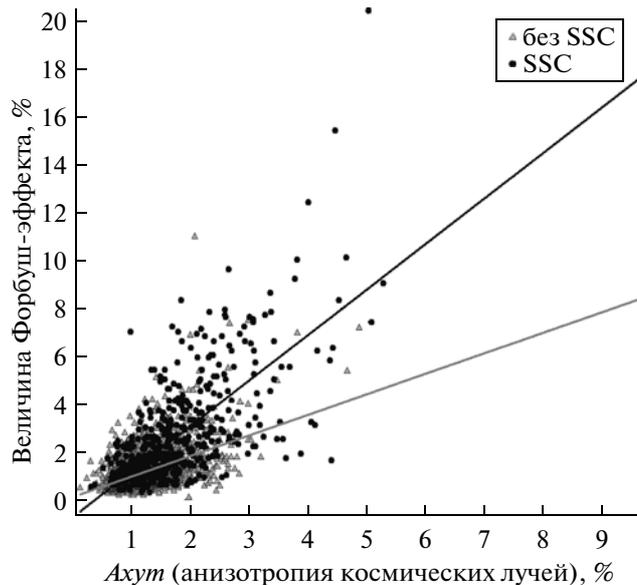


Рис. 6. Зависимость величины ФЭ от анизотропии галактических КЛ для S- и NS-групп.

$= 25.5 \pm 0.5$; максимальная анизотропия в одной группе наблюдается до минимума ФП, а в другой — после. Нетрудно найти и другие отличия в проявлениях анизотропии, и мы планируем обсудить их в другой работе.

Далее рассмотрим зависимость величины ФЭ от внешних параметров. В качестве параметра, хорошо характеризующего возмущение солнечного ветра, возьмем $V_m B_m$ [Belov et al., 2001]. На рисунке 7 представлено поведение амплитуды ФЭ A_F в зависимости от величины этого параметра. Видна существенная разница между группами: события в группе S являются более возмущенными. В этих событиях, как правило, больше и скорость, и межпланетное магнитное поле. Если определять долю событий в S- и NS-группах при параметре $V_m B_m > 8$, то будет выделено 35 событий ($\sim 1/15$) для S-группы и 14 событий ($\sim 1/174$) для группы NS. При $V_m B_m > 15$ события группы NS вообще отсутствуют, а в S есть 7 таких событий ($\sim 1/77$). Мы вновь видим, что S-группе соответствуют более сильные межпланетные возмущения. Не менее важно, что различна связь между A_F и $V_m B_m$ (коэффициент линейной регрессии $b_S = 0.46 \pm 0.03$ в группе S, а в NS-группе $b_{NS} = 0.21 \pm 0.01$). Мы видим, что при одинаковом возмущении межпланетной среды, события в S-группе, сопровождаются большим по величине ФЭ, чем события в NS-группе. Например, если параметр возмущения солнечного ветра $V_m B_m$ равен 10, то для событий группы S средняя величина ФЭ будет $\approx 4.9\%$, а для событий NS-группы $\sim 2.6\%$, что почти вдвое меньше. Такое различие в эффективности заставляет думать, что при совпадении в величине $V_m B_m$

межпланетные возмущения разных групп различны в чем-то другом, например, в размерах или структуре, и это дает возможность предполагать, что в разных группах преобладают разные источники возмущений солнечного ветра.

Подобные же различия между группами выявлялись, когда вместо $V_m B_m$ мы брали другие характеристики возмущения солнечного ветра, например B_{max} или R_B . Возмущения S-группы и при такой замене заметно эффективнее модулируют КЛ по сравнению с NS-группой.

Таким образом, межпланетные возмущения имеют не только разную структуру, но и модулируют КЛ различным образом. Мы вправе предполагать, что в двух группах преобладают различные механизмы модуляции КЛ, и связывать S-группу преимущественно с СМЕ, а NS-группу – с высокоскоростными потоками солнечного ветра из корональных дыр. Разумеется, речь идет только о некотором преобладании, и оба механизма действуют в обеих группах. Следует сделать еще одну оговорку. Сделанные выводы, строго говоря, справедливы только для специальных выборок, из которых мы исключили перекрывающиеся и близкие по времени события. Скорее всего, событий, обусловленных СМЕ, было исключено больше, и это могло повлиять на результаты.

На рисунке 8 показана зависимость величины ФЭ от A_p -индекса геомагнитной активности для выделенных групп. Все события были разделены по уровням геомагнитной активности в зависимости от максимального Kp -индекса (Kp_{max}). Случаи с $Kp_{max} < 2$ отнесены к спокойному уровню, а с $2_0 \leq Kp_{max} \leq 3_+$ к слабовозмущенному. $Kp_{max} = 4_-$, 4_0 , 4_+ относятся к возмущенному уровню, а более высокие Kp_{max} – к геомагнитным бурям разной мощности (http://www.swpc.noaa.gov/NOAA_scales/index.html#GeomagneticStorms).

Можно видеть, что большие геомагнитные бури представлены и в S-, и в NS-группах, но при одной и той же геомагнитной активности величины ФЭ в группе S значительно больше, чем в группе NS. Можно было бы сказать, что межпланетные возмущения группы S более эффективно модулируют космические лучи и менее эффективно возмущают магнитосферу Земли. Однако мы знаем, что самые сильные геомагнитные бури – это обычно бури с внезапным началом. В нашей выборке есть только две исключительно большие бури ($Kp_{max} = 9_0$), и они находятся в S-группе.

Очевидно преобладание S-группы и для других классов больших бурь. Поэтому, по-видимому, точнее будет следующая формулировка. Межпланетные возмущения в NS-группе достаточно эффективны в создании геомагнитной активности и менее эффективны в модуляции КЛ. Иногда по-

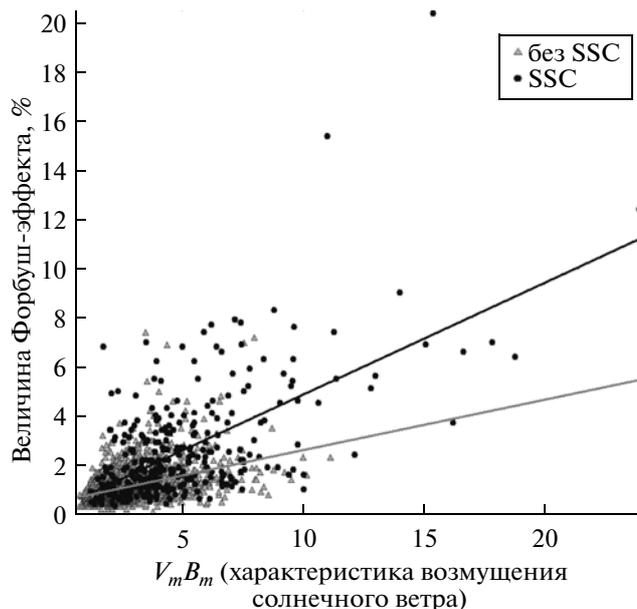


Рис. 7. Зависимость величины ФЭ от параметра $V_m B_m$ (характеристики возмущения солнечного ветра).

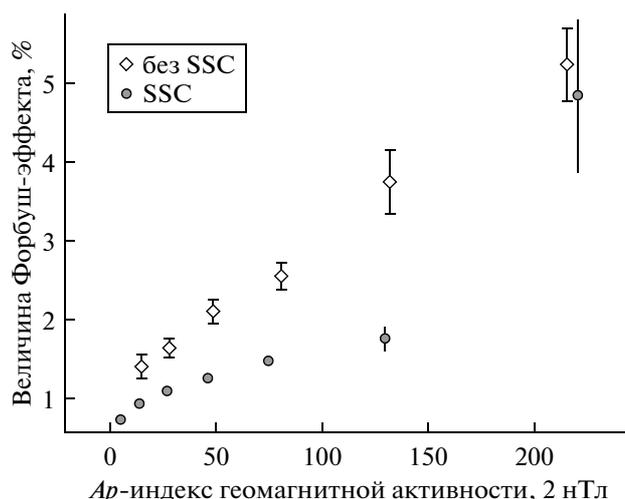


Рис. 8. Зависимость величины ФЭ от A_p -индекса геомагнитной активности.

сле постепенного начала может развиваться и очень большая геомагнитная буря. Очень большое Форбуш-понижение в этих случаях также возможно, но менее вероятно.

4. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Созданная нами база данных по Форбуш-эффектам и межпланетным возмущениям достаточно велика и представительна, чтобы обеспечить сравнительный статистический анализ событий различных типов.

Выборки событий с внезапным началом (S-группа) и с постепенным началом (NS-группа) существенно различаются между собой. В S-группе оказались в среднем более мощные события. Межпланетные возмущения двух групп различаются и по структуре.

Межпланетные возмущения, относящиеся к S-группе, эффективнее модулируют космические лучи и создают большие Форбуш-понижения по сравнению с возмущениями NS-группы, имеющими сходные характеристики.

Одним и тем же уровням геомагнитной активности в NS-группе соответствуют Форбуш-понижения меньшей величины, чем в S-группе.

Полученные результаты говорят в пользу того, что в выделенных группах преобладают разные механизмы модуляции галактических космических лучей. События S-группы в большей мере обусловлены выбросами солнечного вещества (СМЕ), в то время как значительная часть событий группы NS связана с высокоскоростными потоками плазмы из корональных дыр.

Работа частично поддержана РФФИ грантом 11-02-01478, Программой № 6 Президиума РАН “Нейтронная физика и астрофизика”, Госконтрактом Министерства науки № 14.740.11.0609. Авторы благодарны коллективам станций космических лучей, обеспечивающим данные непрерывной регистрации нейтронной компоненты: (<http://cr0.izmiran.ru/ThankYou>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Иванов К.Г.* Солнечные источники потоков межпланетной плазмы на орбите Земли // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 36. № 2. С. 19–27. 1996.
- *Belov A. V., Ivanov K. G.* Forbush-effects in 1977–1979 // Proc. 25th Int. Cosmic Ray Conf., Durban, South Africa, July 28–August 8 1997. V. 1. P. 421–424. 1997.
- *Belov A.V., Eroshenko E.A., Yanke V.G.* Modulation effects in 1991–1994 years // Proc. 25th ICRC. Durban, South Africa, July 28–August 8 1997. V. 1. P. 437–440. 1997.
- *Belov A.V., Eroshenko E.A., Yanke V.G.* Global and local indices of cosmic ray activity // Proc. 26th ICRC. Salt Lake City. V.6. P. 472–475. 1999.
- *Belov A.V.* Large-scale modulation: View from the Earth // Space Sci. Revs. V. 93. P. 71–96. 2000.
- *Belov A.V., Eroshenko E.A., Oleneva V.A., Struminsky A.B., Yanke V.G.* What determines the magnitude of Forbush decreases? // Adv. Space Res. V. 27. № 3. P. 625–630. 2001.
- *Belov A.V.* Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena Universal Heliophysical Processes // Proc. Intern. Astronomical Union, IAU Symp. V. 257. P. 439–450. 2009.
- *Burlaga L.F., Klein L., Sheeley N.R.Jr., Michels D.J., Howard R.A., Koomen M.J., Schwenn R., Rosenbauer H.* A magnetic cloud and a coronal mass ejection // Geophys. Res. Lett. V. 9. P. 1317–1320. 1982.
- *Cane H.V.* Cosmic ray decreases and magnetic clouds // J. Geophys. Res. V. 98. № A3. P. 3509–3512. 1993.
- *Cane H.V.* CMEs and Forbush decreases // Space Sci. Revs. V. 93. № 1–2. P. 55–77. 2000.
- *Dorman L.I.* Cosmic ray variation and space research. M.: AN USSR. 1027 p. 1963.
- *Dorman L.I.* Cosmic rays: Variations and space explorations. Amsterdam: North-Holland Publ. Co. 675 p. 1974.
- *Forbush S.E.* On the effects in the cosmic-ray intensity observed during magnetic storms // Phys. Rev. V. 51. P. 1108–1109. 1937.
- *Iucci N., Parisi M., Storini M., Villaresi G.* High speed solar wind streams and galactic cosmic ray modulation // Nuovo Cimento. V. 2C. № 4. P. 421–438. 1979.
- *Iucci N., Pinter S., Parisi M., Storini M., Villaresi G.* The longitudinal asymmetry of the interplanetary perturbation producing Forbush decreases // Nuovo Cimento V. 9. C. № 1. P. 39–50. 1986.
- *Kitamura M.* On the close correlation between the cosmic ray storm and the “SC-type” magnetic storm // Rep. Ionosph. Space Res. Japan. V. 8. P. 145–148. 1954.
- *Lockwood J. A.* Forbush decreases in the cosmic radiation // Space Sci. Revs. V. 12. № 5. P. 658–715. 1971.
- *Mayaud P.N., Romana A.* Supplementary geomagnetic data, 1957–1975. IAGA Bulletin. N 39. Paris: IUGG Pub. Office. 1977.
- *McComas D.J., Goldstein R., Gosling J.T., Skoug R.M.* Ulysses’ second orbit: Remarkably different solar wind // Space Sci. Revs. V. 97. № 1–4. P. 99–103. 2001.
- *Parker E.N.* Interplanetary dynamical processes. N. Y.: Interscience Publishers. 272 p. 1963.
- *Richardson I.G., Cane H.V.* Proc. Solar Wind 11/SOHO 16. Ed. B. Fleck et al. (Noordwijk: ESA), 154.1, SP–592, 2005.
- *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. № 1. P. 189–237. 2010.