

УДК 524.1.352; 523.62-726; 550.385.4

ФОРБУШ-ЭФФЕКТЫ И ГЕОМАГНИТНЫЕ БУРИ

© 2024 г. А. В. Белов¹, Е. А. Белова¹, Н. С. Шлык¹*, М. А. Абунина¹,
А. А. Абунин¹, С. М. Белов¹

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн

им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия

*e-mail: nshlyk@izmiran.ru

Поступила в редакцию 18.10.2023 г.

После доработки 19.01.2024 г.

Принята к публикации 25.01.2024 г.

Выделены и исследованы события Форбуш-эффектов в галактических космических лучах (по данным сети нейтронных мониторов) и сопутствующих геомагнитных возмущений за длительный период с 1957 по 2022 гг. Проанализированы статистические связи между различными параметрами вариаций потока космических лучей и индексами геомагнитной активности. Установлено, что величина Форбуш-эффектов нелинейно зависит от класса геомагнитной бури. Найдена умеренная корреляция (до 0.67) между экстремальными значениями различных индексов геомагнитной активности (A_p , K_p , Dst) и характеристиками космических лучей. Показано, что одновременная регистрация экстремальных значений параметров космических лучей и геомагнитной активности происходит далеко не всегда, а зависит от знака B_z -компоненты межпланетного магнитного поля в конкретном событии.

DOI: 10.31857/S0016794024030015, EDN: SNFUWI

1. ВВЕДЕНИЕ

Связь Форбуш-эффектов (ФЭ) и геомагнитных бурь (ГМБ) была очевидной с момента их открытия. ФЭ сразу были определены, как явление снижения интенсивности космических лучей (КЛ), происходящее во время магнитной бури [Forbush, 1937, 1938]. Поначалу исследователи решили, раз явления наблюдаются одновременно, значит, одно является следствием другого, и предположили, что ФЭ вызываются ГМБ. Но позже были внесены уточнения. Так, сам Скотт Форбуш несколько лет спустя [Forbush, 1954], анализируя данные по горизонтальному магнитному полю и КЛ ст. Нуансауо с 1937 по 1952 гг., указывает на то, что большинство понижений интенсивности КЛ во время геомагнитных возмущений не позволяет обнаружить количественных характеристик, хорошо коррелирующих между собой. Затем Yoshida and Akasofu [1966] указали, что величина понижения главной фазы ГМБ не показывает очевидной связи с величиной ФЭ, но отметили, что начало значительных ФЭ более тесно связано с возникновением последовательных внезапных импульсов/микроразрывов геомагнитного поля, чем со ступенчатой функцией, по-

добной внезапному началу бури (*Sudden Storm Commencement* — SSC). Однако, позже Ye et al. [1987] рассмотрели ГМБ разной величины за 1966–1982 гг. и установили, что характеристики ФЭ связаны с величиной K_p -индекса геомагнитной активности (ГА): чем больше K_p и длительность бури, тем больше величина ФЭ и скорость понижения интенсивности КЛ. Позднее Kudela and Storini [2005] показали, что величины, характеризующие ГМБ и ФЭ, не всегда пропорциональны.

Известно, что сами магнитные бури (а именно изменение жесткостей обрезания) также оказывают влияние на профиль ФЭ, только оно проявляется не в снижении интенсивности КЛ, а, наоборот, в некотором росте, часто по данным отдельных станций. Такие магнитосферные эффекты описаны в работах Dorman [1963], Debrunner et al. [1979], Baisultanova et al. [1995], Dvornikov and Sdobnov [2002], Belov et al. [2005]. Однако они наблюдаются не всегда, не так велики, как сами ФЭ, хотя, безусловно, напрямую связаны с ГМБ и наблюдаются только под воздействием магнитного поля Земли.

Несмотря на то, что и геомагнитные бури, и Форбуш-эффекты имеют общее солнечное и межпланетное происхождение, в толковании связи их характеристик по-прежнему существуют противоречия, что, возможно, связано с различными механизмами, действующими при возникновении обоих явлений.

В статье Belov et al. [2001] авторы указывают на нелинейность связи максимального Kp -индекса и величины ФЭ. Исследуя длительный период времени (1978–1996 гг.), они приходят к выводу, что большинство ГМБ связано с небольшими ФЭ: для $Kp_{max} = 5$ средняя амплитуда ФЭ не превышает 1.5%, а ФЭ величиной >5% регистрируются только во время очень больших и/или экстремальных магнитных бурь.

В обзоре Vennerstrom et al. [2016], посвященном экстремальным ГМБ, указано, что во время всех таких событий были зарегистрированы ФЭ, однако четкой связи между их характеристиками не было установлено. Kane [2010] подтверждает этот вывод: величины геомагнитных возмущений и ФЭ (величиной >4%) по данным нейтронного монитора (НМ) Climax для очень больших бурь 23-го солнечного цикла (СЦ) не пропорциональны друг другу: максимальные отрицательные значения Dst -индекса не регистрируются в тот же час, что и максимальный ФЭ, и эволюция во времени индекса Dst и плотности КЛ очень разнится. Но затем в работе Parnahaj et al. [2013] было показано, что для 250 ФЭ, вызванных корональными выбросами массы (КВМ), коэффициент корреляции между величиной ФЭ и минимальным значением Dst -индекса составляет 0.28–0.4, увеличиваясь для КВМ типа гало. Позже эти же авторы [Parnahaj and Kudela, 2015] показали, что ФЭ, хотя и не всегда сопровождаются ГМБ, имеют тенденцию коррелировать свою амплитуду с минимальным значением индекса Dst (например, ни один ФЭ <5% не сопровождается большой бурей, а каждый ФЭ >9% сопровождается как минимум умеренной бурей). Lingri et al. [2016] также указывают, что параметры ФЭ коррелируют с параметрами ГМБ, но четкое соответствие и взаимосвязь их до сих пор не ясны.

Aslam and Badruddin [2017] для нескольких событий 23-го цикла показали, что снижение интенсивности КЛ начинается раньше, чем снижение Dst , а восстановление Dst начиналось раньше, чем восстановление интенсивности потока КЛ. В работе Kharayat et al. [2016] показано, что снижение интенсивности КЛ в дни возникновения ГМБ в 23-м СЦ, наоборот, имеет аналогичную картину с поведением Dst -индекса. Alhassan et al. [2021] для автоматически отобранных про-

граммой 230 ФЭ за 1998–2002 гг. (по данным НМ Oulu) выяснили, что двумерный регрессионный анализ указывает на значительную линейную зависимость между большими ФЭ (величиной >3%), данными солнечного ветра (СВ) и геомагнитными индексами. Mishra et al. [2022], исследуя 5 больших ГМБ и данные по КЛ с высокоширотных станций, показали хорошую связь процентного уменьшения интенсивности космических лучей с индексом Dst во время бури, при этом заметного отставания во времени между обсуждаемыми параметрами не обнаружено. В свою очередь, Мелкумян и др. [2023], исследуя данные по 944 событиям с 1997 по 2021 гг., показали, что развитие ФЭ и геомагнитных возмущений происходит быстрее для спорадических событий (вызванных КВМ), и распределения времени достижения минимума Dst -индекса и плотности КЛ совпадают, а для событий, связанных с высокоскоростными потоками из корональных дыр или несколькими источниками, минимум плотности КЛ достигается позже, чем минимум Dst -индекса. Кроме того, Мелкумян и др. [2024] получили, что Dst -индекс достигает экстремального значения в конце фазы спада ФЭ для всех типов солнечных источников, независимо от характера начала события (наличие или отсутствие SSC).

Ряд работ посвящен обсуждению предвестников начала ГМБ. Из-за влияния фронта приближающегося КВМ, интенсивность потока КЛ изменяется (предпонижение и/или предвозрастание) [Kudela et al., 2000; Dorman, 2005; Papailiou et al., 2021]. Munakata et al. [2000] исследовали 14 очень больших бурь ($Kp \geq 8$) и 25 больших бурь ($Kp \geq 7$) с 1992 по 1998 гг. и обнаружили, что 68% событий имели четко идентифицируемые предвестники в данных мюонного детектора за 6–9 ч до SSC. Зверев и др. [2020] указали на изменения амплитуд зональных (северо-южных) компонент изотропной интенсивности КЛ и первых двух моментов их углового распределения (по данным мировой сети НМ) при приближении возмущений межпланетной среды еще до начала возмущения геомагнитного поля за время от двух часов до суток. Ye et al. [2022], используя ансамблевый самоадаптирующийся метод частотно-временного анализа данных интенсивности КЛ, показали, что можно еще эффективнее обнаруживать предвестники ГМБ, вызванных КВМ, в виде значительного увеличения спектральной амплитуды в определенном диапазоне частот.

Таким образом, несмотря на довольно длительную (86 лет!) историю изучения ФЭ и связей характеристик ФЭ и геомагнитной активности, сегодня существуют довольно противоречивые

заклучения на этот счет и многое еще неясно. Главное, от чего мы будем отталкиваться в наших рассуждениях, это то, что ГМБ — это магнитосферное явление, а ФЭ — гелиосферное. Размеры магнитосферы на пять порядков меньше размеров гелиосферы. Одни и те же межпланетные возмущения по-разному действуют на эти две системы, столь отличающиеся по размеру. ГМБ обычно длится 1–3 дня. ФЭ детектируется на Земле тоже в течение нескольких дней, но только потому, что мы его наблюдаем, находясь внутри системы магнитосферы. На самом деле ФЭ начинается еще раньше (от 15 ч до 3–5 дней) и затем, после нашего наблюдения, может регистрироваться на расстояниях в несколько десятков а.е., то есть в итоге длится около месяца и более. Крупные межпланетные возмущения, соединяясь и взаимопоглощаясь, могут действовать и далее до границы гелиосферы и длиться много месяцев. Мы всегда видим только малую часть явления ФЭ, и оно же, но в другой точке и в другое время, может выглядеть совершенно иначе.

Важно учесть, что магнитное поле и космические лучи — это разные физические сущности. Магнитное поле существует в каждой точке пространства (например, магнитосферы Земли) в каждый момент времени. Его можно измерить магнитометром. Космические лучи — это некое статистическое сообщество, которое можно измерить, только задав дополнительные характеристики: либо количество в определенном объеме пространства за определенное время, либо — для потока — площадь сечения.

Кроме того КЛ — это заряженные частицы, движущиеся с большими скоростями, сравнимыми со скоростью света, и создающие свои поля. При встрече с магнитным полем в гелиосфере они вращаются вокруг его силовых линий с огромным радиусом. Для частиц жесткостью 10 ГВ ларморов радиус у Земли будет $> 10^{12}$ м. Это означает, что в небольшой отрезок времени (например, час) детекторы на Земле регистрируют частицы, собранные с большого объема. Среди них могут быть частицы, прилетевшие и с обратной стороны от Солнца, и от орбиты Юпитера. По этим причинам исследования ФЭ — это не тот случай, когда обоснованные выводы можно сделать по нескольким событиям. Понять главные особенности ФЭ можно, собрав все (или почти все) данные по вариациям космических лучей и подвергнув их комплексному анализу.

Форбуш-эффект — “буря” в космических лучах, которая является следствием бури в межпланетном пространстве и часто наблюдается одновременно с геомагнитной бурей. Все эти три вида

возмущений: возмущения солнечного ветра, магнитосферы и космических лучей тесно взаимосвязаны, и их естественно исследовать совместно. ФЭ наблюдаются не только на Земле, но и на космических аппаратах в космических лучах малых энергий. Однако этим данным или не хватает статистической точности, или же возникают трудности в разделении модуляционных и ускорительных эффектов. Основным источником информации о ФЭ остаются наземные наблюдения КЛ, прежде всего данные нейтронных мониторов.

Целью настоящей работы является исследование различных характеристик ФЭ и соответствующих индексов геомагнитной активности (ГА), зарегистрированных во время этих событий, с использованием большого статистического материала с 1957 по 2022 гг.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Представленные ниже результаты получены с помощью баз данных, созданных в ИЗМИРАН в последние 28 лет. В основном, здесь использовались две базы данных. Первая из них — VCR (*Variations of Cosmic Rays*) — объединяет расчеты вариаций плотности и анизотропии КЛ, выполненные методом глобальной съемки [Белов и др., 2018] за каждый час для 65 лет наблюдений (1957–2022 гг.). Результаты, полученные для КЛ с жесткостью 10 ГВ, объединены с параметрами солнечного ветра и характеристиками геомагнитной активности, включенными в базу данных OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>). Еще более активно используется другая база данных: FEID — *Forbush Effects and Interplanetary Disturbances* (<https://tools.izmiran.ru/feid/>). Выделяя события для этой базы данных, мы старались включить все Форбуш-эффекты в наиболее широком определении и сделать это таким образом, чтобы каждый ФЭ соответствовал своему крупномасштабному возмущению межпланетной среды.

В базу данных FEID включены: 1) все события, сопровождавшиеся ударной волной, даже в тех случаях, когда явного эффекта в плотности КЛ не наблюдалось; 2) все достаточно большие ($> 1\%$) изменения плотности КЛ независимо от условий в межпланетной среде; 3) небольшие (как правило, 0.5–1.0%, иногда несколько меньше) события, если в это время наблюдалось выраженное возмущение солнечного ветра.

Такой каталог ФЭ имеет ряд очевидных преимуществ. Во-первых, он основан на физических характеристиках (плотность, анизотропия) косми-

ческих лучей определенной (10 ГВ) жесткости, а не на данных отдельных детекторов КЛ. Во-вторых, количественные характеристики отдельных событий намного (почти на порядок) точнее, чем используемые в каталогах, основанных на данных отдельных НМ [Lockwood, 1990; Cane et al., 1996]. В-третьих, наш каталог охватывает все события, наблюдавшиеся в определенный период, а не только специально выбранные. В него включены события с малой амплитудой, которые являются следствием слабых межпланетных возмущений или значительных солнечных событий с источниками в далекой долготной зоне. В-четвертых, каждое событие (ФЭ) в космических лучах связывается в нашем каталоге с определенным межпланетным возмущением и, по возможности, с его солнечным источником. Поэтому это каталог не только Форбуш-эффектов, но и крупных межпланетных возмущений. Это отличает его от других списков ФЭ, где зачастую одно большое событие — это, по существу, серия эффектов, обусловленных различными источниками.

Наша база данных охватывает период с июля 1957 г. по декабрь 2022 г., т.е. практически весь период функционирования мировой сети станций НМ, и включает в себя более 8500 событий. Каждое событие характеризуется десятками различных параметров (как наблюдаемых, так и рассчитываемых), характеризующих вариации КЛ и сопутствующих явлений. Для КЛ это характеристики заряженных частиц с жесткостью 10 ГВ. Главной из них является величина ФЭ (AF), за которую принимается максимальная вариация плотности КЛ во время события.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Связь средних значений параметров космических лучей и геомагнитной активности

За исследуемый период времени (июль 1957 г. — декабрь 2022 г.) в базе данных FEID содержится 8524 события, но имеем ли мы право анализировать их, не разделяя по типу источника и не отделяя события с несколькими солнечными источниками (смешанные)? В этом исследовании мы исходили из того, что смешанные межпланетные возмущения схоже действуют на ГА и ФЭ, поэтому учитываем все события при расчетах коэффициентов корреляции.

Параметры, отражающие геомагнитную активность, и характеристики космических лучей должны быть связаны между собой в силу существования общего источника (межпланетного возмущения). Рис. 1 показывает связь между максимальным значением Kp -индекса геомагнитной активности

и параметрами потока КЛ в соответствующем событии: AF — величина ФЭ, $A_{\text{хутах}}$ — максимальное значение экваториальной составляющей анизотропии КЛ, D_{min} — максимальное часовое понижение плотности КЛ. Чтобы получить этот рисунок, все события были разбиты на 8 групп, в соответствии с максимальным Kp -индексом (Kp_{max}). Так, в одну группу вошли все события с $Kp_{\text{max}} = 5-, 5, 5+$, т.е. все малые магнитные бури. Другую группу составили умеренные бури (с Kp_{max} от 6– до 6+) и т.д. Все рассчитанные значения приведены ниже в табл. 1.

Хорошо видно, что все зависимости имеют нелинейный характер, хотя определенно существует тенденция к увеличению экстремальных значений параметров КЛ с ростом ГА. При этом наиболее выраженными различия становятся при увеличении геомагнитных возмущений до уровня умеренной магнитной бури.

Анализ рис. 1 и данных табл. 1 также позволяет сделать выводы о том, что спокойному и слабо-возмущенному геомагнитному фону соответствуют очень маленькие ФЭ ($\leq 1\%$). Даже во время малых магнитных бурь ($Kp_{\text{max}} = 5-...5+$) средний ФЭ $\leq 1.5\%$. Во время сильных магнитных бурь ($Kp_{\text{max}} \geq 7-$) типичная величина ФЭ составляет 3% и больше. И только во время очень сильных магнитных бурь ($Kp_{\text{max}} \geq 8$) типичная величина ФЭ становится очень большой (5% и больше).

На рис. 2 показано процентное распределение долей разных видов геомагнитных возмущений за период наблюдения 1957–2022 гг. Видно, что слабые возмущения составляют самую большую часть (31.6%), а доля сильных магнитных бурь с $Kp_{\text{max}} \geq 7$ составляет всего 6.4% всех событий.

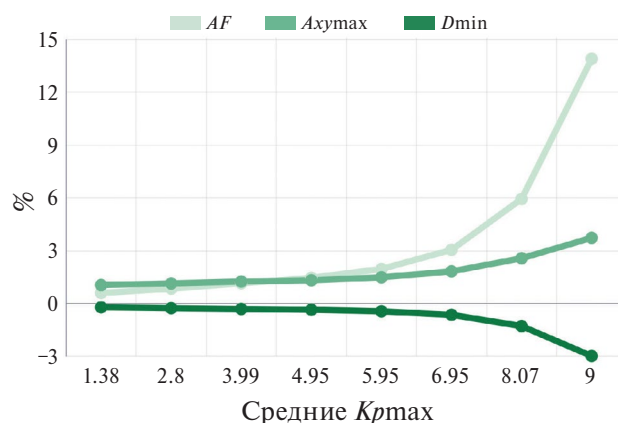


Рис. 1. Взаимосвязь средних значений параметров КЛ (AF , $A_{\text{хутах}}$ и D_{min}) с Kp -индексом ГА.

Таблица 1. Параметры ГА и КЛ

Геомагнитная обстановка (Kp_{max})	Количество событий	Среднее значение			
		Kp_{max}	$AF, \%$	$A_{хu_{max}}, \%$	$D_{min}, \%$
Спокойная 0...2–	512 (6%)	1.38 ± 0.01	0.61 ± 0.02	1.05 ± 0.02	-0.23 ± 0.00
Слабовозмущенная 2...3+	2691 (31.6%)	2.80 ± 0.01	0.85 ± 0.01	1.13 ± 0.01	-0.27 ± 0.00
Возмущенная 4–...4+	2201 (25.8%)	3.99 ± 0.01	1.15 ± 0.02	1.23 ± 0.01	-0.32 ± 0.00
Малая магнитная буря 5–...5+	1694 (19.9%)	4.95 ± 0.01	1.45 ± 0.03	1.31 ± 0.01	-0.36 ± 0.00
Умеренная магнитная буря 6–...6+	876 (10.3%)	5.95 ± 0.01	1.96 ± 0.05	1.48 ± 0.02	-0.45 ± 0.01
Сильная магнитная буря 7–...7+	347 (4%)	6.95 ± 0.01	3.04 ± 0.12	1.81 ± 0.05	-0.65 ± 0.03
Очень сильная магнитная буря 8–...9–	186 (2.2%)	8.07 ± 0.03	5.93 ± 0.28	2.54 ± 0.09	-1.29 ± 0.07
Экстремальная магнитная буря 9	16 (0.2%)	9	13.89 ± 1.87	3.72 ± 0.59	-2.99 ± 0.49

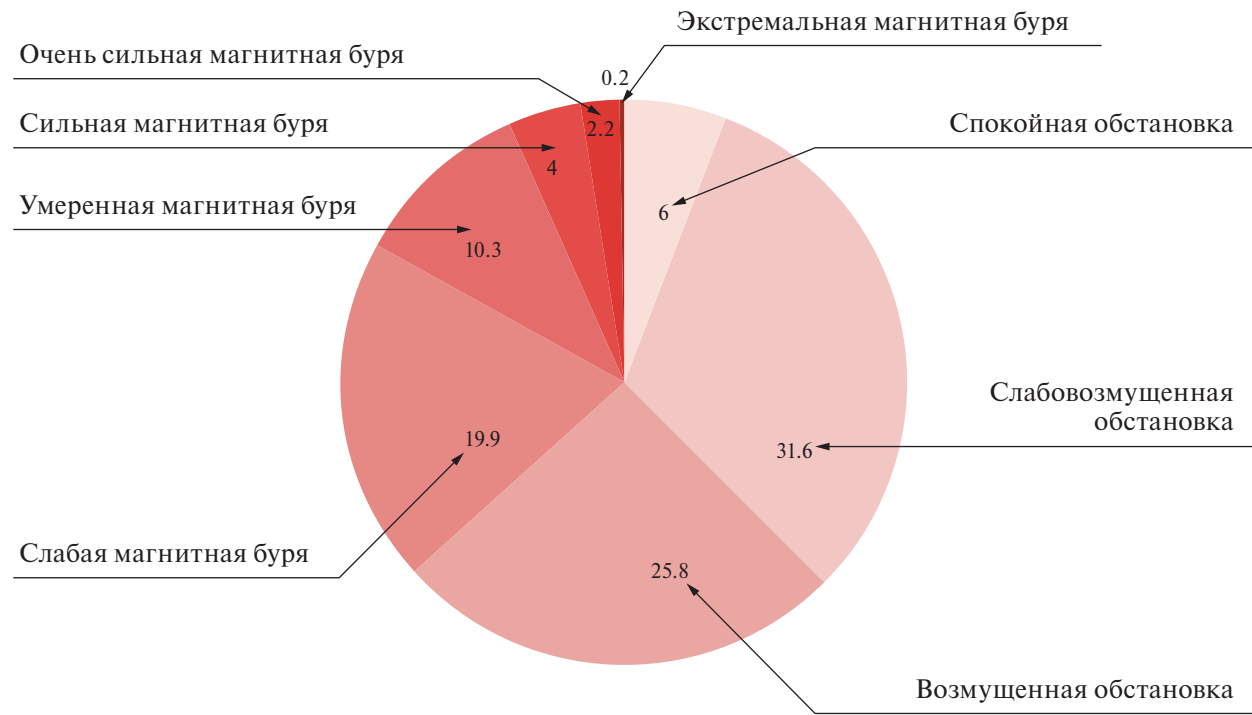


Рис. 2. Процентное распределение различных значений Kp -индекса за 1957–2022 гг.

При хорошем согласии между средними величинами в каждом отдельном случае соотношение изменения уровня ГА и вариаций КЛ может значительно различаться. Возмущение солнечного ветра, способное вызвать магнитную бурю, обязательно повлияет и на космические лучи. Поэтому каждой ГМБ соответствует ФЭ. Однако в наземных наблюдениях этот эффект иногда очень мал и почти не проявляется в изменениях плотности КЛ. Противоположная ситуация, т.е. ФЭ без ГМБ, — это еще более частое явление (чуть более 60% событий в нашей базе данных). Однако при увеличении амплитуды ФЭ эта доля быстро падает, например, Форбуш-эффекты величиной $>5\%$ без магнитной бури почти не встречаются, и в этих редких случаях (0.14%, 12 событий) геомагнитная активность все-таки заметно возрастает.

Приведем примеры событий вышеупомянутых видов. На рис. 3–5 на верхней панели показаны параметры СВ (левая ось: модуль межпланетного магнитного поля (ММП) ($|B|$, нТл) — кривая с круглыми маркерами; северо-южная компонента ММП (B_z , нТл) — кривая с квадратными маркерами; правая ось: скорость СВ (V , км/с) — кривая с ромбами). Средняя панель показывает вариации КЛ жесткостью 10 ГВ (левая ось: плотность потока КЛ (A_0 , %) — кривая с ромбами, северо-южная составляющая анизотропии КЛ (A_z , %) — вертикальные столбики на кривой A_0 ; правая ось: экваториальная составляющая анизотропии КЛ (A_{xy} , %) — столбики). На нижней панели приведены данные геомагнитных индексов: Dst (кривая с круглыми маркерами, правая ось) и Kp (столбики, левая ось). Вертикальной линией отмечено начало события (SSC — по ударной волне или *ons* — по резким изменениям в СВ и/или КЛ).

Пример события 26–28 июля 2004 г., когда был зарегистрирован и большой ФЭ (средняя панель, $AF = 14.4\%$, $D_{min} = -4.72\%$, $A_{x_{max}} = 2.6\%$, $A_{z_{range}} = 6.45\%$ — максимальная разность значений A_z в событии), и очень сильная ГМБ (нижняя панель, $Kp_{max} = 9$), показан на рис. 3.

Описываемое межпланетное возмущение связано с воздействием на околоземное космическое пространство коронального выброса массы, случившегося днем ранее, а затем высокоскоростного потока из южной корональной дыры, проходившей центральный солнечный меридиан 25–26 июля. Максимальная скорость в этом событии составила 1072 км/с, а модуль ММП — 26.1 нТл, B_z -компонента ММП длительное время была отрицательной, достигая значения -18 нТл.

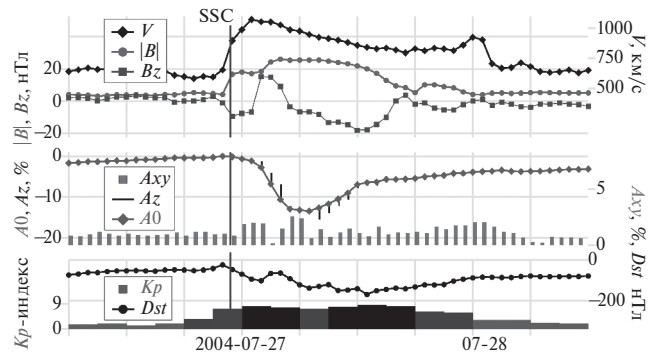


Рис. 3. Событие 26–28 июля 2004 г., в котором зарегистрирована очень сильная ГМБ ($Kp_{max} = 9$) и большой ФЭ (14.4%).

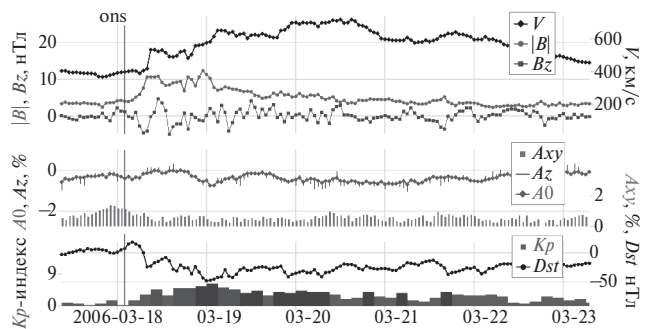


Рис. 4. Событие 18–22 марта 2006 г., в котором зарегистрирована умеренная ГМБ и ФЭ малой амплитуды (0.7 %).

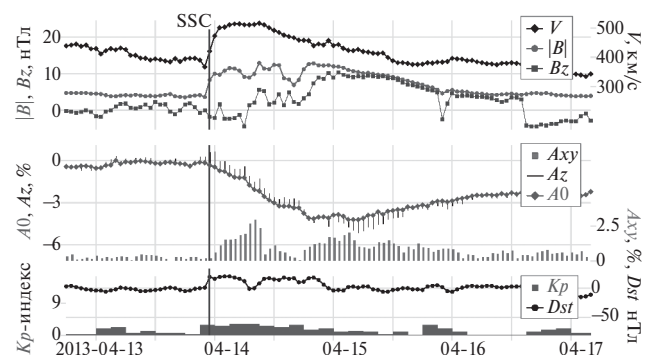


Рис. 5. Событие 13–16 апреля 2013 г., в котором не зарегистрирована ГМБ, но наблюдался большой ФЭ (4.4%).

Событие, изображенное на рис. 4, связано с длительным воздействием на Землю (18–22 марта 2006 г.) высокоскоростного потока из корональной дыры, проходившей центральный солнечный меридиан 16–17 марта 2006 г. Максимальная скорость СВ превысила 700 км/с, а значение модуля

ММП – 12 нТл. В результате 18–19 марта была зарегистрирована умеренная ГМБ ($Kp_{\max} = 6+$), но при этом ФЭ оказался мал ($AF = 0.7\%$, $D_{\min} = -0.3\%$, $A_{\text{ху}} = 1.34\%$, $A_{\text{зrange}} = 0.76\%$). Это не удивительно, поскольку ФЭ создается, в первую очередь, в области взаимодействия разноскоростных потоков СВ, а внутри самого потока из корональной дыры магнитные поля имеют регулярный характер и наблюдается, в основном, восстановление интенсивности потока КЛ. При этом геомагнитная обстановка менялась от возмущенной к слабовозмущенной, пока скорость СВ не опустилась до 500 км/с.

На рис. 5 приведен пример события 13–16 апреля 2013 г., когда наблюдался достаточно большой ФЭ ($AF = 4.4\%$, $D_{\min} = -0.57\%$, $A_{\text{ху}} = 2.98\%$, $A_{\text{зrange}} = 2.05\%$), но магнитная буря не была зарегистрирована (геомагнитная обстановка менялась от спокойной до слабовозмущенной, $Kp_{\max} = 3+$). Данное межпланетное возмущение было связано с корональным выбросом массы, произошедшим 11 апреля. Несмотря на то, что в этом событии наблюдался довольно резкий рост скорости СВ ($V_{\max} = 516$ км/с) и модуля ММП ($B_{\max} = 12.9$ нТл), B_z -компонента ММП была, в основном, положительной, что является очевидной причиной отсутствия значительных геомагнитных возмущений (более подробное обсуждение влияния B_z описано в разделе 3.2.).

Сравним, совпадают ли рекордные ГМБ с рекордными ФЭ. На рис. 6 приведена корреляция минимальных значений Dst -индекса и амплитуды ФЭ (AF) для событий с $Dst_{\min} < -200$ нТл. Таких событий всего 73 (из 8524). Коэффициент корреляции небольшой $cc = -0.35345$. Такие события (выделенные кружки), как 31 марта 2001 г.

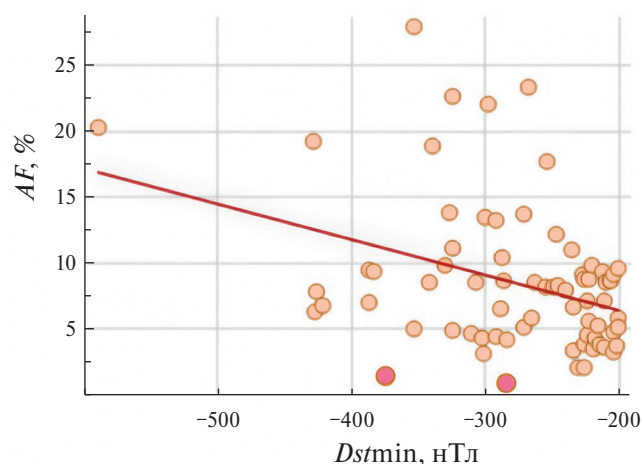


Рис. 6. Взаимосвязь рекордных ГМБ и ФЭ.

($Dst_{\min} = -269$ нТл и $AF = 0.81\%$) и 8 ноября 2004 г. ($Dst_{\min} = -374$ нТл и $AF = 1.26\%$), портят картину. Следует сделать вывод о том, что межпланетные возмущения, вызывающие самые большие геомагнитные возмущения, не всегда приводят к регистрации самых больших ФЭ.

Интересно отметить, что в последние десятилетия, в целом, стало меньше ГМБ и ФЭ. Для сравнения, в 2001–2022 гг. было зарегистрировано 98 больших бурь ($Kp_{\max} \geq 7-$), а за предыдущие 22 года (с 1979 по 2000 гг.) – 239 аналогичных бурь. Отметим, что связь между уровнем ГА и величиной ФЭ стала более тесной (коэффициент корреляции между Ap -индексом ГА и амплитудой ФЭ вырос с 0.62 до 0.71 в более поздний период), следовательно, условия их возникновения стали более схожими. Возникла новая нормальность. И если до 2001 г. средняя амплитуда ФЭ, соответствующего большой ГМБ, составляла $4.1 \pm 0.24\%$, то после 2001 г. большим следует считать ФЭ амплитудой $4.73 \pm 0.43\%$.

3.2. Влияние знака и величины B_z на параметры космических лучей и геомагнитной активности

Геомагнитная активность определяется воздействием солнечного ветра на магнитосферу Земли. Пока солнечный ветер остается спокойным, спокойно и магнитное поле Земли, и все индексы геомагнитной активности остаются на низком уровне [Dungey, 1961; Akasofu, 1981]. Величина скорости СВ и полного вектора индукции ММП являются важнейшими параметрами, характеризующими межпланетную возмущенность. В работах Belov et al. [2001], Belov [2009] и Абуни и др. [2012] показано, что произведение максимальных значений скорости СВ ($V_{\max}$) и индукции ММП ($B_{\max}$) является удачным индексом для оценки мощности межпланетных возмущений. При этом произведение $V_{\max}B_{\max}$ дополнительно нормируется на величины скорости и поля, соответствующие спокойному СВ ($V_0 = 400$ км/с и $B_0 = 5$ нТл), для того чтобы работать с безразмерными и достаточно небольшими величинами: $VmBm = V_{\max}B_{\max}/V_0B_0$. На рис. 7 приведены связи минимальных величин Dst -индекса ГА ($Dst_{\min}$) и амплитуды ФЭ (AF) с параметром $VmBm$ (6102 события, для которых имелись данные по полю и скорости).

Коэффициенты корреляции оказываются высокими как для геомагнитной активности, так и для модуляции КЛ и составляют -0.7 и 0.71 ± 0.01 соответственно.

Однако для геомагнитных возмущений еще важнее одна из составляющих полного векто-

ра ММП, а именно B_z -компонента, направленная вдоль магнитной оси Земли [Rostoker and Fälthammar, 1967; Kubicka et al., 2016; Kay and Gopalswamy, 2018 и ссылки в них].

На рис. 8 показана связь среднесуточных значений Dst -индекса ГА и плотности потока КЛ (A_0 , жесткостью 10 ГВ) с B_z -составляющей ММП за 1991–2022 гг. (11116 суток, содержащих ряд однородных данных по КЛ, нормированных к 2009 г.). Хорошо видно, что при отрицательных и положительных значениях B_z связи имеют разный характер, и экстремальные значения Dst -индекса наблюдаются именно при отрицательных B_z . Для значений плотности потока КЛ картина совершенно другая: знак B_z -компоненты ММП не является определяющим, распределение оказывается симметричным.

Таким образом, можно заключить, что знак B_z -составляющей ММП имеет ключевое значение для развития магнитной бури, но второстепенен для вариаций КЛ и почти не влияет на изменение плотности их потока.

3.3. Анализ связи параметров космических лучей и геомагнитной активности для событий с разным типом начала

Линейный регрессионный анализ, выполненный для 8524 событий (см. табл. 2), для связи величины ФЭ (AF) и максимального Ap -индекса ГА дал коэффициент корреляции 0.665, а для корреляции с минимальным Dst -индексом коэффициент составил -0.615 .

Это более высокие коэффициенты по сравнению с анализом 2059 событий за 15 лет (1977–1980,

1987–1997 гг. и другие отдельные периоды), приведенном в работе Белов и др. [2001], 0.54 и -0.47 соответственно. Это доказывает увеличение коэффициента корреляции для более длительного исследуемого периода.

При проведении регрессионного анализа было решено не приводить корреляции с Kp -индексом ГА по причине его логарифмической природы.

В табл. 2 также приведены коэффициенты корреляции и коэффициенты линейной регрессии для величин индексов ГА (Ap_{max} и Dst_{min}) и величин четырех характеристик КЛ (для частиц с жесткостью 10 ГВ): AF , D_{min} , $A_{x_{max}}$ и $A_{z_{range}}$ для трех групп событий (All – все события, SSC – входящие в группу All события с внезапным началом (1838 событий), $No\ SSC$ – входящие в группу All события без внезапного начала – 6686 событий). Самые высокие коэффициенты корреляции наблюдаются в группе событий с внезапным началом.

Похожие коэффициенты корреляции для пар Dst_{min}/AF , $Dst_{min}/A_{x_{max}}$, $Dst_{min}/A_{z_{range}}$ (0.68; 0.48 и 0.49 соответственно в группе с SSC ; 0.27; 0.27 и 0.3 соответственно в группе без SSC) были получены в работе Мелкумян и др. [2023] для значительно меньшего периода, с 1997 по 2021 гг., при условии ограничения выборки по величине B_z -компоненты ММП ($B_{z_{min}} < -5$ нТл).

На рис. 9–12 приведены изображения соответствующих регрессий. В каждой строке первая картинка – все события, вторая – из них события с SSC , третья – из них события без SSC .

На рис. 9 хорошо видно, что величины ФЭ в группе SSC значительно больше, чем в группе

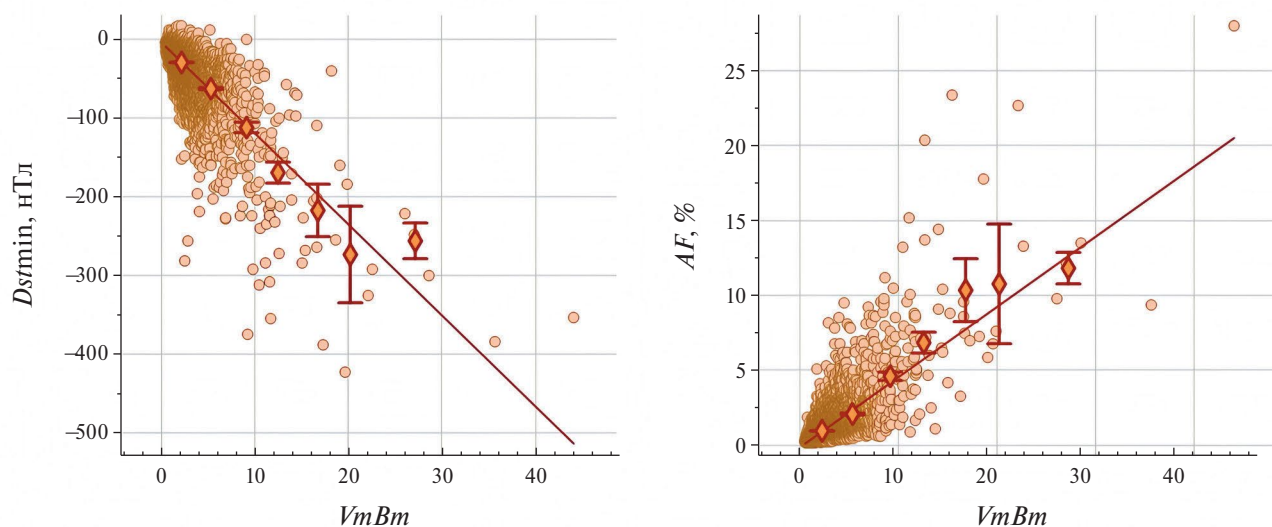


Рис. 7. Связь минимальных величин Dst -индекса ГА (Dst_{min}) и амплитуды ФЭ (AF) с параметром $VmBm$.

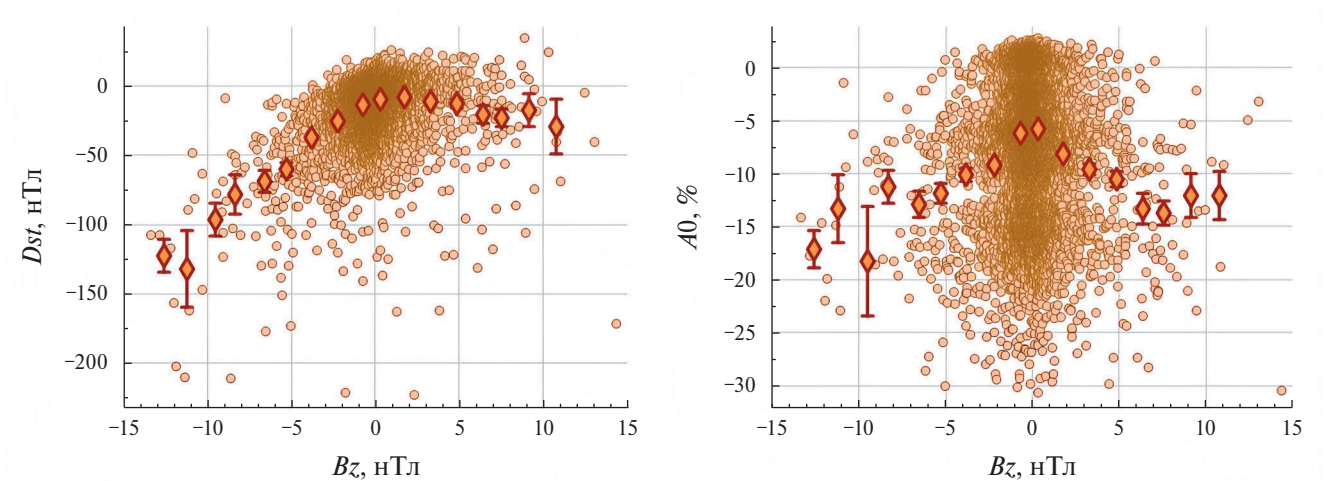


Рис. 8. Связь среднесуточных значений *Dst*-индекса ГА и плотности потока КЛ (*A0*) с *Bz*-составляющей ММП (ромбами показаны величины, усредненные по равным интервалам изменения значений *Bz*).

No SSC. Межпланетные возмущения группы *SSC* более эффективно модулируют КЛ и не менее эффективно возмущают магнитосферу Земли (рис. 9, панели *б* и *д*). Все кроме одной экстремальной бури ($A_{pmax} = 400$) также находятся в группе *SSC*. Очевидно преобладание *SSC*-группы и для других классов бурь. В то же время встречаются события,

когда исключительно большая буря соответствует скромному значению ФЭ (рис. 9*в*). Значит, межпланетные возмущения в группе *No SSC* достаточно эффективны в отношении ГА и менее эффективны в модуляции КЛ.
Коэффициенты линейной регрессии ниже для событий группы *No SSC*, о чем свидетельствует

Таблица 2. Коэффициенты корреляции и коэффициенты линейной регрессии для различных параметров ГА и КЛ

Параметры	Коэффициент корреляции			Коэффициент линейной регрессии		
	<i>All</i>	<i>SSC</i>	<i>No SSC</i>	<i>All</i>	<i>SSC</i>	<i>No SSC</i>
A_{pmax}/AF	0.665 ± 0.006	0.67 ± 0.01	0.45 ± 0.01	0.0236 ± 0.0003	0.0266 ± 0.0008	0.012 ± 0.0003
$Dstmin/AF$	-0.614 ± 0.007	-0.63 ± 0.01	-0.42 ± 0.01	-0.0244 ± 0.0003	-0.028 ± 0.001	-0.0117 ± 0.0003
$A_{pmax}/Dmin$	-0.586 ± 0.007	-0.61 ± 0.02	-0.32 ± 0.01	-0.00450 ± 0.00007	-0.0054 ± 0.0002	-0.0020 ± 0.0001
$Dstmin/Dmin$	0.511 ± 0.008	0.53 ± 0.02	0.27 ± 0.01	0.00439 ± 0.00008	0.0053 ± 0.0002	0.0018 ± 0.0001
A_{pmax}/A_{xymax}	0.444 ± 0.009	0.46 ± 0.02	0.21 ± 0.01	0.0064 ± 0.0001	0.0062 ± 0.0003	0.0036 ± 0.0002
$Dstmin/A_{xymax}$	-0.419 ± 0.009	-0.43 ± 0.02	-0.23 ± 0.01	-0.0067 ± 0.0002	-0.0063 ± 0.0003	-0.004 ± 0.0002
A_{pmax}/A_{zrange}	0.482 ± 0.009	0.49 ± 0.02	0.32 ± 0.01	0.009 ± 0.0002	0.0078 ± 0.0003	0.0079 ± 0.0003
$Dstmin/A_{zrange}$	-0.473 ± 0.008	-0.49 ± 0.02	-0.33 ± 0.01	-0.0099 ± 0.0002	-0.0088 ± 0.0004	-0.0084 ± 0.0003

и меньший наклон регрессионных прямых на рис. 9, это также подтверждает меньшую геоэффективность этих событий.

Анализ рис. 10 и данных табл. 2 позволяет сделать аналогичные выводы о связи величины

максимального часового понижения плотности КЛ (D_{min}) с индексами ГА. В событиях группы SSC изменения плотности КЛ более резкие и соответствуют большим экстремальным значениям индексов A_p и Dst . Наклон регрессионных пря-

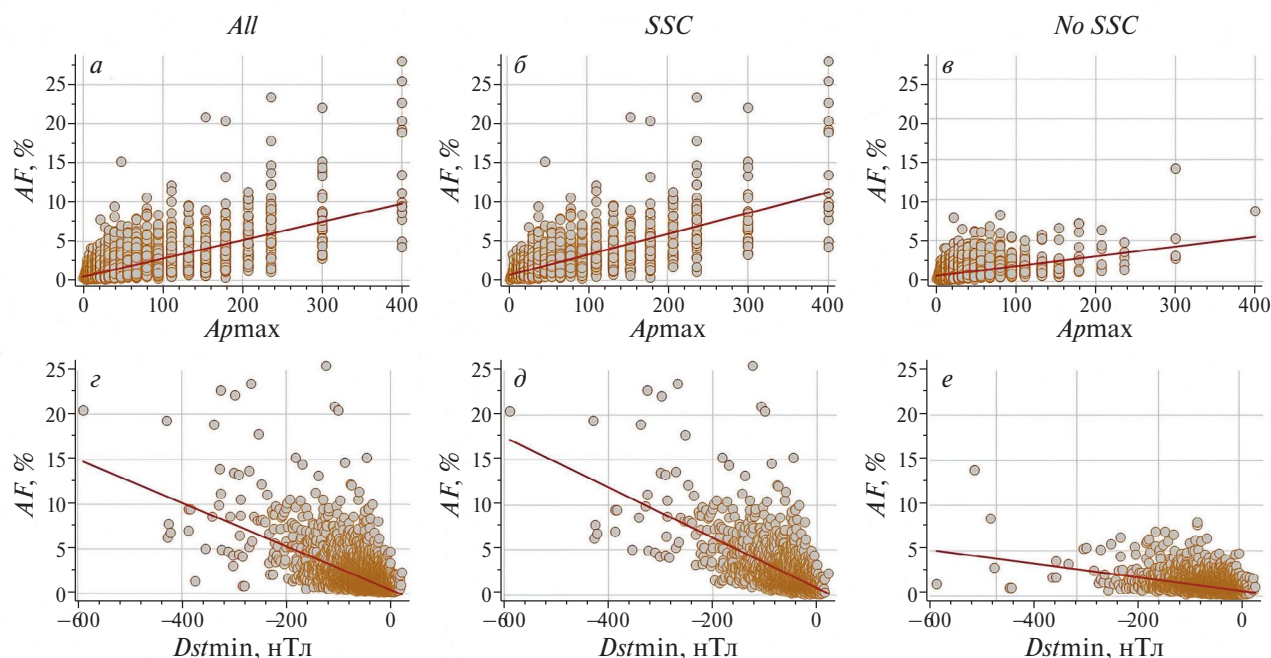


Рис. 9. Взаимосвязь амплитуды ФЭ (AF) с индексами ГА (A_{pmax} , $Dstmin$) для выделенных групп.

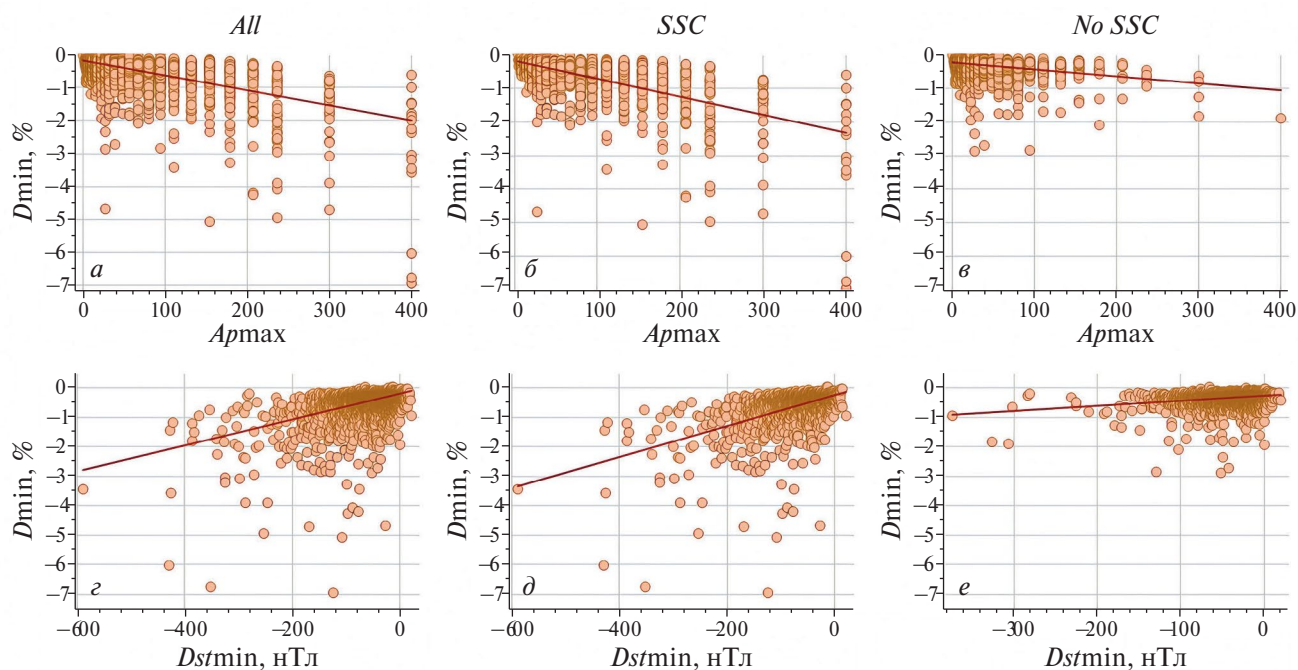


Рис. 10. Взаимосвязь величины максимального часового понижения плотности КЛ (D_{min}) с индексами ГА (A_{pmax} , $Dstmin$) для выделенных групп.

мых в группе *No SSC* также значительно меньше, чем для событий группы *SSC*.

На рис. 11 и рис. 12 видим похожую на рис. 9 ситуацию, так как анизотропия КЛ сильно свя-

зана с изменениями изотропной части потока КЛ и амплитудой ФЭ. Отметим, что на рис. 9д, 10д, 11д, 12д сильно выпадает точка со значением $Dst_{min} = -589$ нТл — это знаменитое Квебекское

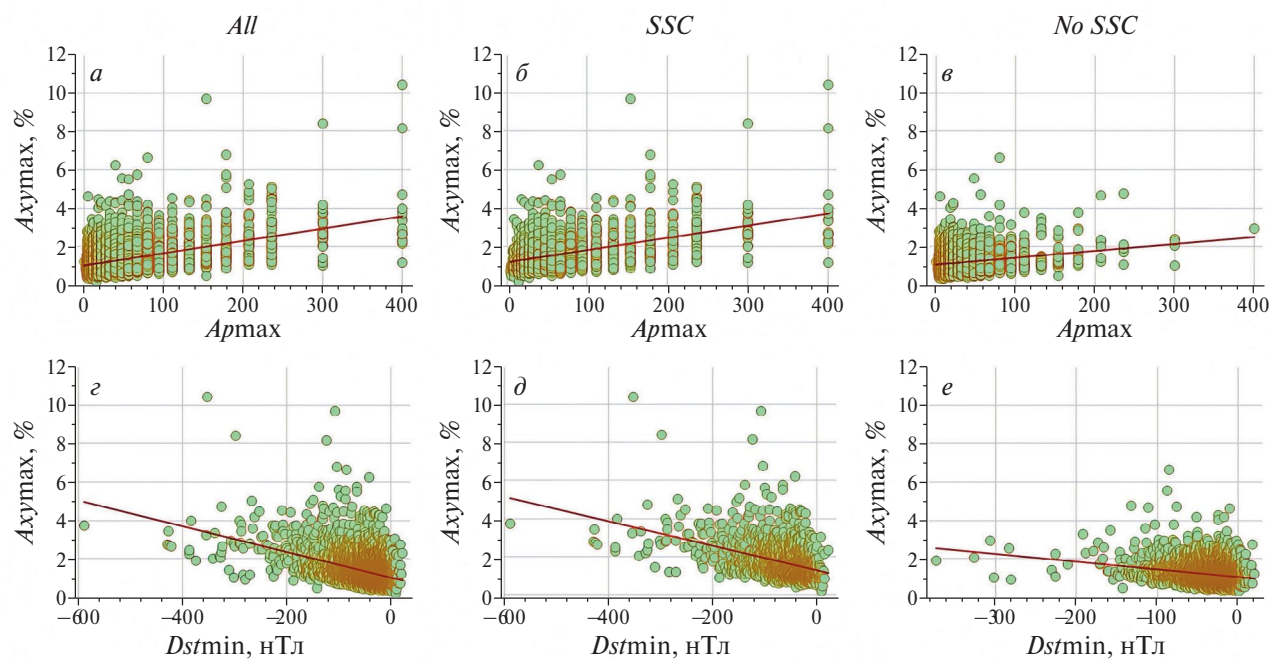


Рис. 11. Взаимосвязь величины экваториальной составляющей векторной анизотропии КЛ (A_{xmax}) с индексами ГА (A_{pmax} , Dst_{min}) для выделенных групп.

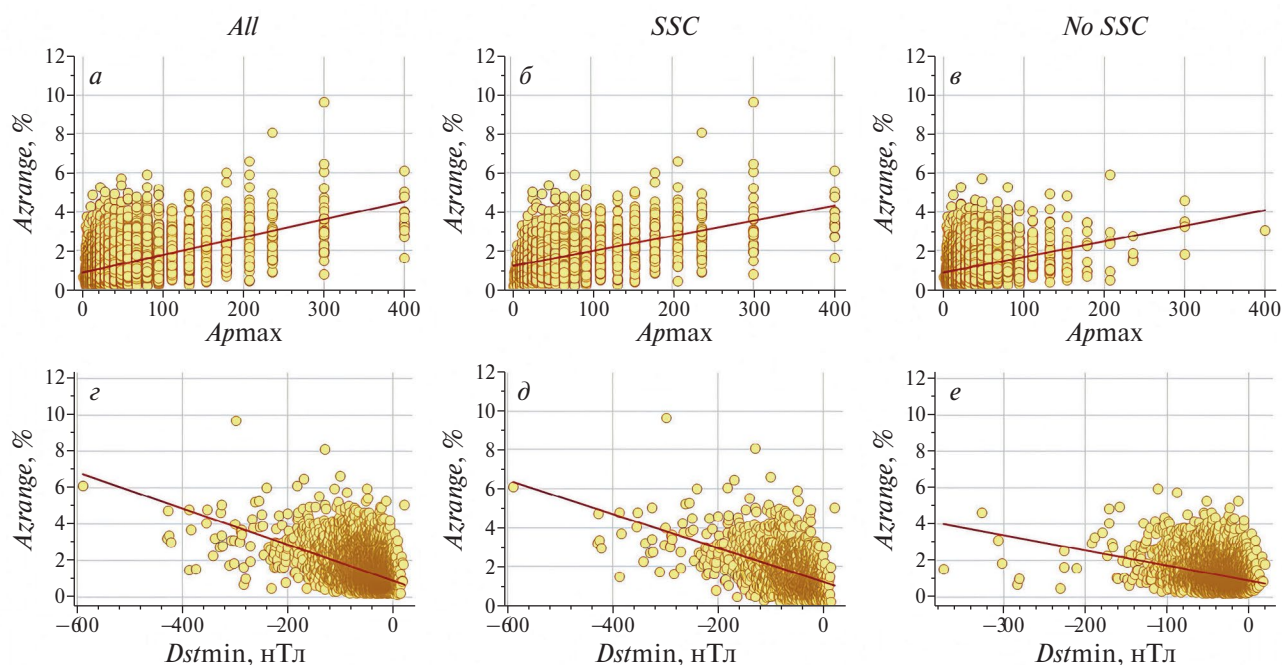


Рис. 12. Взаимосвязь величины северо-южной составляющей векторной анизотропии КЛ (A_{zrange}) с индексами ГА (A_{pmax} , Dst_{min}) для выделенных групп.

событие, отключившее электростанции на севере Канады на 9 часов и показавшее полярное сияние жителям Мексики. Тогда была зарегистрирована экстремальная магнитная буря, третья по величине за время современных наблюдений с 1932 г. Амплитуда ФЭ в этом событии также получилась очень большой $AF = 20\%$, но не рекордной.

Однако следует отметить, что северо-южная составляющая векторной анизотропии КЛ (*Azrange*, рис. 12) менее других параметров подвержена изменениям при делении на группы *SSC* и *No SSC*: величины коэффициентов линейной регрессии практически одинаковы. Выявленная особенность требует дополнительного исследования.

4. ВЫВОДЫ

1. Бури в солнечном ветре, магнитосфере Земли и космических лучах тесно связаны. Между средними характеристиками межпланетных и геомагнитных возмущений и вариациями КЛ можно найти количественную связь и использовать ее в диагностике проявлений солнечной активности.

2. Нарушение связи между параметрами ФЭ и ГА (рис. 1) чаще всего говорит о величине и модуле B_z -компоненты ММП (рис. 8). Знак B_z -составляющей ММП имеет ключевое значение для развития магнитной бури, но второстепенен для вариаций КЛ и почти не влияет на их плотность. Кроме того, ФЭ определяется условиями в протяженной гелиосферной области, тогда как геомагнитная активность зависит от локальной ситуации вблизи Земли. Возмущение солнечного ветра, способное вызвать магнитную бурю, не может не повлиять на КЛ. Каждой ГМБ соответствует хотя бы небольшое понижение плотности КЛ (на 1–2%), тогда как ФЭ без магнитной бури – довольно частое явление.

3. Взаимосвязь между характеристиками КЛ и ГА разумно использовать для классификации Форбуш-эффектов. Классификация магнитных бурь, отраженная в табл.1, практически общепринята (NOAA Space Weather Scales, <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>). Градацию Форбуш-эффектов можно согласовать с градацией магнитных бурь так, чтобы сходно называемые явления и наблюдались бы с приблизительно одинаковой частотой. Проанализировав частоту появления Форбуш-эффектов и магнитных бурь за один и тот же 65-летний период, мы пришли к следующим выводам. Частоте регистрации малых и умеренных ГМБ соответствуют ФЭ величиной $AF > 2\%$ (в вариациях плотности КЛ с жесткостью 10 ГВ). Аналогично, частоте сильных ГМБ соответствует довольно большой ФЭ

величиной $AF > 3\%$, а очень большие ФЭ ($AF > 5\%$) наблюдаются так же редко, как очень сильные ГМБ.

Авторы наметили себе такие направления для дальнейших исследований связи параметров ФЭ и ГА, как:

– сравнение различных исторических периодов;

– выяснение связей ФЭ и ГА с характеристиками СВ (например, скоростью, индексом Акасофу).

4. Установленную взаимосвязь между ГМБ и ФЭ можно использовать в будущем для моделирования величины ФЭ за почти столетний период с 1830-х по 1950-е годы, когда наука (гелиогеофизика) уже собирала данные о ГМБ, но еще не научилась регистрировать величину потоков КЛ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Дополнительное финансирование на проведение данного исследования не привлекалось, работа проводилась в рамках госзадания.

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”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абуни А.А., Абунина М.А., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Форбуш-эффекты с внезапным и постепенным началом // Геомагнетизм и аэронаомия. Т. 52. № 3. С. 313–320. 2012.
- Белов А.В., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Струминский А.Б., Янке В.Г. Чем обусловлены и с чем связаны Форбуш-эффекты? // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 65. № 3. С. 373–376. 2001.
- Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке Г.В., Оленева В.А., Абунина М.А., Абуни А.А. Метод глобальной съемки для мировой сети нейтронных мониторов // Геомагнетизм и аэронаомия. Т. 58. № 3. С. 374–389. 2018. <https://doi.org/10.7868/S0016794018030082>
- Зверев А.С., Григорьев В.Г., Гололобов П.Ю., Стародубцев С.А. Мониторинг параметров анизотропии космических лучей в реальном времени и краткосрочный прогноз геомагнитных возмущений // Солнечно-земная физика. Т. 6. № 4. С. 42–45. 2020. <https://doi.org/10.12737/szf-64202005>
- Мелкумян А.А., Белов А.В., Шлык Н.С., Абунина М.А., Абуни А.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Форбуш-понижения и геомагнитные возмущения: 1. События,

- связанные с разными типами солнечных и межпланетных источников // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 63. № 6. С. 699–714. 2023. <https://doi.org/10.31857/S0016794023600503>
- Мелкумян А.А., Белов А.В., Шлык Н.С., Абунина М.А., Абунин А.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Форбуш-понижения и геомагнитные возмущения: 2. Сравнение солнечных циклов 23–24 и событий с внезапными и постепенным началом // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 64. № 1. С. 39–54. 2024. <https://doi.org/10.31857/S0016794024010057>
- Akasofu S.-I. Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere // Space Sci. Rev. V. 28. № 2. P. 121–190. 1981. <https://doi.org/10.1007/BF00218810>
- Alhassan J.A., Okike O., Chukwude A.E. Testing the effect of solar wind parameters and geomagnetic storm indices on Galactic cosmic ray flux variation with automatically-selected Forbush decreases // Res. Astron. Astrophys. V. 21. № 9. ID 234. 2021. <https://doi.org/10.1088/1674-4527/21/9/234>
- Aslam O.P.M., Badruddin Study of the geoeffectiveness and galactic cosmic-ray response of VarSITI-ISEST campaign events in solar cycle 24 // Solar Phys. V. 292. № 9. ID 135. 2017. <https://doi.org/10.1007/s11207-017-1160-x>
- Baisultanova L.M., Belov A.V., Yanke V.G. Magnetospheric effect of cosmic rays within the different phases of magnetic storms / Proc. ICRC 24th, August 28 – September 8, 1995, Rome, Italy. V. 4. P. 1090–1093. 1995.
- 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. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(01\)00095-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00095-3)
- Belov A., Baisultanova L., Eroshenko E., Mavromichalaki H., Yanke V., Pchelkin V., Plainaki C., Mariatos G. Magnetospheric effects in cosmic rays during the unique magnetic storm on November 2003 // J. Geophys. Res. — Space. V. 110. № 9. ID A09S20. 2005. <https://doi.org/10.1029/2005JA011067>
- 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>
- Cane H.V., Richardson I.G., von Rosenfinge T.T. Cosmic ray decreases: 1964–1994 // J. Geophys. Res. — Space. V. 101. № 10. P. 21561–21572. 1996. <https://doi.org/10.1029/96JA01964>
- Debrunner H., Flueckiger E., von Mandach H., Arens M. Determination of the ring current radii from cosmic ray neutron monitor data for the 17 December 1971 magnetic storm // Planet. Space Sci. V. 27. № 5. P. 577–581. 1979. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(79\)90155-7](https://doi.org/10.1016/0032-0633(79)90155-7)
- Dorman L.I. Progress in Elementary Particle and Cosmic Ray Physics. Eds. J.G. Wilson and S.A. Wouthuysen. New York: Elsevier. 1963.
- Dorman L.I. Space weather and dangerous phenomena on the Earth: principles of great geomagnetic storms forecasting by online cosmic ray data // Ann. Geophys. V. 23. № 9. P. 2997–3002. 2005. <https://doi.org/10.5194/angeo-23-2997-2005>
- Dvornikov V., Sdobnov V. Variation in the rigidity spectrum and anisotropy of cosmic rays at the period of Forbush effect on 12–15 July 1982 // Int. J. Geomag. Aeron. V. 3. № 3. P. 217–228. 2002.
- Dungey J.W. Interplanetary magnetic field and the auroral zones // Phys. Rev. Lett. V. 6. № 2. P. 47–48. 1961. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.6.47>
- Forbush S.E. On world-wide changes in cosmic-ray intensity // Phys. Rev. V. 54. № 12. P. 975–988. 1937. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.54.975>
- Forbush S.E. On cosmic-ray effects associated with magnetic storms // Terr. Mag. V. 43. № 3. P. 203–218. 1938. <https://doi.org/10.1029/TE043i003p00203>
- Forbush S.E. World-wide cosmic-ray variations, 1937–1952 // J. Geophys. Res. V. 59. № 4. P. 525–542. 1954. <https://doi.org/10.1029/JZ059i004p00525>
- Kane R. Severe geomagnetic storms and Forbush decreases: interplanetary relationships reexamined // Ann. Geophys. V. 28. № 2. P. 479–489. 2010. <https://doi.org/10.5194/angeo-28-479-2010>
- Kay C., Gopalswamy N. The effects of uncertainty in initial CME input parameters on deflection, rotation, Bz, and arrival time predictions // J. Geophys. Res. — Space. V. 123. № 9. P. 7220–7240. 2018. <https://doi.org/10.1029/2018JA025780>
- Kharayat H., Prasad L., Mathpal R., Garia S., Bhatt B. Study of cosmic ray intensity in relation to the interplanetary magnetic field and geomagnetic storms for Solar Cycle 23 // Solar Phys. V. 291. № 2. P. 603–611. 2016. <https://doi.org/10.1007/s11207-016-0852-y>
- Kubicka M., Möstl C., Amerstorfer T., Boakes P.D., Feng L., Eastwood J.P., Törmänen O. Prediction of geomagnetic storm strength from inner heliospheric in situ observations // Astrophys. J. V. 833. № 2. ID 255. 2016. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/833/2/255>
- Kudela K., Storini M., Hofer M.Y., Belov A. Cosmic rays in relation to space weather // Space Sci. Rev. V. 93. № 1–2. P. 153–174. 2000. <https://doi.org/10.1023/A:1026540327564>
- Kudela K., Storini M. Cosmic ray variability and geomagnetic activity: A statistical study // J. Atmos. Sol.-Terr. Phy. V. 67. № 10. P. 907–912. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.02.018>
- Lingri D., Mavromichalaki H., Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Abunin A., Abunina M. Solar activity parameters and associated Forbush Decreases during the minimum between Cycles 23 and 24 and the ascending phase of Cycle 24 // Solar Phys. V. 291. № 3. P. 1025–1041. 2016. <https://doi.org/10.1007/s11207-016-0863-8>
- Lockwood J.A. List of Forbush decreases 1954–1990 // Solar Geophys. Data. V. 549. P. 154–163. 1990.
- Mishra R.K., Sihwal A., Baral R., Adhikari B., Braga C.R., Gautam S.P., Das P.K., Migoya-Orue Y. Wavelet analysis of Forbush Decreases at high-latitude stations during geomagnetic disturbances // Solar Phys. V. 297. № 2. ID 26. 2022. <https://doi.org/10.1007/s11207-022-01948-z>
- Munakata K., Bieber J.W., Yasue S., Kato C., Koyama M., Akahane S., Fujimoto K., Fujii Z., Humble J.E., Duldig M.L.

- Precursors of geomagnetic storms observed by the muon detector network // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 105. № 12. P. 27457–27468. 2000. <https://doi.org/10.1029/2000JA000064>
- Papailiou M., Abunina M., Mavromichalaki H., Belov A., Abunin A., Eroshenko E., Yanke V. Precursory signs of large Forbush Decreases // *Solar Phys.* V. 296. № 6. ID 100. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11207-021-01844-y>
- Parnahaj I., Kudela K., Kancirova M., Pastircak B. On cosmic ray decreases, geomagnetic storms and CMEs / *Proc. 33rd ICRC, Rio de Janeiro, Brazil, 2–9 July 2013*. P. 3583–3586. 2013.
- 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. № 1. ID 35. 2015. <https://doi.org/10.1007/s10509-015-2484-3>
- Rostoker G., Fälthammar C.-G. Relationship between changes in the interplanetary magnetic field and variations in the magnetic field at the Earth's surface // *J. Geophys. Res.* V. 72. № 23. P. 5853–5863. 1967. <https://doi.org/10.1029/JZ072i023p05853>
- Vennerstrom S., Lefevre L., Dumbović M., Crosby N., Malandraki O., Patsou I., Clette F., Veronig A., Vršnak B., Leer K., Moretto T. Extreme Geomagnetic Storms – 1868–2010 // *Solar Phys.* V. 291. № 5. P. 1447–1481. 2016. <https://doi.org/10.1007/s11207-016-0897-y>
- Ye Z.-H., Lu X.-T., Zong Q.-G. The variation of galactic cosmic ray intensity and the Kp category of magnetic disturbance / *Proc. 20th ICRC*. V. 4. P. 59–62. 1987.
- Ye Q., Wang C., He F., Xue B., Zhang X. The frequency-domain characterization of Cosmic Ray Intensity variations before Forbush decreases associated with geomagnetic storms // *Space Weather*. V. 20. № 3. ID e2021SW002863. 2022. <https://doi.org/10.1029/2021SW002863>
- Yoshida S., Akasofu S.-I. The development of the Forbush decrease and the geomagnetic storm fields // *Planet. Space Sci.* V. 14. № 10. P. 979–986. 1966. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(66\)90134-6](https://doi.org/10.1016/0032-0633(66)90134-6)

Forbush Decreases and Geomagnetic Storms

A. V. Belov¹, E. A. Belova¹, N. S. Shlyk^{1,*}, M. A. Abunina¹, A. A. Abunin¹, S. M. Belov¹

¹*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Moscow, Troitsk, Russia*

*e-mail: nshlyk@izmiran.ru

Forbush decreases in galactic cosmic rays (according to data from a network of neutron monitors) and accompanying geomagnetic disturbances over a long period from 1957 to 2022 have been identified and studied. Statistical relationships between various parameters of cosmic ray flux and geomagnetic activity indices are analyzed. It has been established that the magnitude of Forbush decreases depends nonlinearly on the class of geomagnetic storm. A moderate correlation is found between the extreme values of various geomagnetic activity indices (*Ap*, *Kp*, *Dst*) and the characteristics of cosmic rays. It is also shown that the simultaneous registration of extreme values of cosmic rays and geomagnetic activity parameters does not always occur but depends on the sign of the *Bz*-component of the interplanetary magnetic field in a particular event.