

**РЕКУРРЕНТНЫЕ И СПОРАДИЧЕСКИЕ ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЯ  
В 23-м И 24-м СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛАХ****RECURRENT AND SPORADIC FORBUSH DECREASES DURING  
SOLAR CYCLES 23–24****А.А. Мелкумян**

*Российский государственный университет нефти и газа  
(Национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина,  
Москва, Россия, amelkumyan6@gmail.com*

**А.В. Белов**

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

**М.А. Абунина**

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

**А.А. Абунин**

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

**Е.А. Ерошенко**

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

**В.А. Оленева**

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

**В.Г. Янке**

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

**A.A. Melkumyan**

*Gubkin Russian State University of Oil and Gas  
(National Research University),  
Moscow, Russia, amelkumyan6@gmail.com*

**A.V. Belov**

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

**M.A. Abunina**

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

**A.A. Abunin**

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

**E.A. Eroshenko**

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

**V.A. Oleneva**

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

**V.G. Yanke**

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

**Аннотация.** По материалам базы данных форбуш-эффектов и межпланетных возмущений с использованием статистических методов и большого количества экспериментального материала сравнивались рекуррентные (вызванные высокоскоростными потоками плазмы из корональных дыр) и спорадические (связанные с корональными выбросами массы) форбуш-понижения (ФП) в солнечных циклах 23 и 24, максимумах этих циклов и минимуме между ними. Результаты показали следующее: 1) в количестве и величине ФП проявляется солнечная цикличность; 2) распределения параметров ФП и солнечного ветра различаются для рекуррентных и спорадических событий; 3) в максимуме цикла 23 преобладают спорадические ФП, в минимуме между циклами — рекуррентные ФП; 4) средние значения параметров ФП выше для спорадических, чем для рекуррентных событий, причем разница значений существенно больше в максимумах циклов. Средняя величина ФП для спорадических событий увеличивается от минимума к максимумам; для рекуррентных — почти не зависит от фазы солнечной активности, что, по-видимому, связано с малым изменением основных характеристик и геоэффективности низкоширотных корональных дыр.

**Abstract.** A comparison has been made between recurrent (associated with high-speed streams from coronal holes) and sporadic (caused by interplanetary coronal mass ejections (ICMEs)) Forbush decreases (FDs) in solar cycles 23 and 24 (as well as in the maxima of these cycles and the minimum between them). Forbush Effects and Interplanetary Disturbances database created and maintained in IZMIRAN provided a large number of events (about 1700 isolated FDs, among them 350 recurrent FDs, and 207 sporadic FDs selected with high reliability), which allowed us to apply statistical methods. The results revealed that sporadic FDs prevailed in the maxima of the cycles; recurrent FDs, in the minimum between the cycles. FD parameters (magnitude, decrease rate, anisotropy) are larger for sporadic events than for recurrent ones, especially in the maxima of the cycles. FD magnitude is greater in the maxima than in the minimum for sporadic events, and it changes weakly for recurrent ones. The solar wind velocity is on average greater for recurrent events than for sporadic ones; it is larger for recurrent FDs in the minimum and for sporadic FDs in the maxima. The magnetic field is stronger for sporadic FDs than for recurrent ones in the maxima and it is approximately equal for both types of

Средняя скорость солнечного ветра выше для рекуррентных ФП, чем для спорадических, как в максимумах, так и в минимуме солнечной активности, причем для спорадических ФП скорость солнечного ветра выше в максимумах циклов, а для рекуррентных — в минимуме между циклами. Магнитное поле в неоднородностях, связанных со спорадическими ФП, значительно слабее в текущем цикле, чем в предыдущем, что, возможно, является следствием аномального расширения корональных выбросов массы, вызванного низким давлением невозмущенного солнечного ветра; в максимумах солнечных циклов средняя индукция магнитного поля выше для спорадических событий, чем для рекуррентных. Для обоих типов событий длительность главной фазы ФП в максимумах циклов 23 и 24 существенно меньше, чем в минимуме между циклами; в максимуме цикла 23 спорадические ФП развиваются существенно быстрее, чем рекуррентные.

**Ключевые слова:** форбуш-понижение, солнечный ветер, межпланетное магнитное поле, корональные выбросы массы, корональные дыры, солнечный цикл, статистический анализ.

events in the minimum. The magnetic field of ICMEs is weaker in the current solar cycle than in the previous one. The duration of the FD main phase is less in the maxima for both types of events; sporadic FDs developed significantly faster than recurrent ones in the maximum of cycle 23.

**Keywords:** Forbush decrease, solar wind, interplanetary magnetic field, coronal mass ejections, coronal holes, solar cycle, statistical analysis.

---

## ВВЕДЕНИЕ

Форбуш-понижением (ФП) называют изменение плотности и анизотропии космических лучей (КЛ) в крупномасштабных возмущениях солнечного ветра. Во время ФП интенсивность КЛ относительно быстро убывает, а за понижением, как правило, следует более медленное восстановление [Дорман, 1963; Iucci et al., 1979; Forbush, 1937; Lockwood, 1971]. В зависимости от типа возмущений межпланетной среды ФП делятся на две группы: спорадические и рекуррентные. Первые вызваны межпланетными возмущениями (interplanetary coronal mass ejection, ICME), связанными с корональными выбросами массы (coronal mass ejection, CME) [Cane, 2000]; вторые — высокоскоростными потоками плазмы из корональных дыр (coronal hole, CH), вращающихся вместе с Солнцем [Richardson, 2004]. Зависимость характеристик ФП от параметров межпланетных неоднородностей существенно различается для рекуррентных и спорадических событий [Belov, 2009].

Влияние разных типов неоднородностей солнечного ветра на модуляцию КЛ исследовалось во многих работах [Belov et al., 2014; Badruddin, Kumar, 2016; Chertok et al., 2013; Gopalswamy, 2010; Kryakunova et al., 2013]. Наличие большого количества экспериментального материала позволяет применять для исследования этих зависимостей статистические методы [Абунин и др., 2012; Мелкумян и др., 2018а; Bhaskar et al., 2016; Dumbović et al., 2012, 2016]. Абунин и др. [2012] проанализировали сотни ФП, разделенных на две группы: SSC-группа — события с внезапным началом магнитной бури (sudden storm commencement); no-SSC-группа — события с постепенным началом. Предполагалось, что события в SSC-группе в основном вызваны ICMEs, в то

время как события в no-SSC-группе по большей части связаны с высокоскоростными потоками из CHs. Было показано, что события в двух группах значительно отличаются друг от друга: ФП в SSC-группе характеризуются гораздо более резким и глубоким уменьшением плотности КЛ, чем ФП в no-SSC-группе, имеющие более симметричный и гладкий временной профиль. Dumbović et al. [2012] рассчитывали модели линейной регрессии и коэффициенты корреляции между величиной ФП, скоростью солнечного ветра и интенсивностью межпланетного магнитного поля (ММП), а также временные характеристики событий (время между началом ФП и началом возрастания ММП; время между минимумом интенсивности КЛ и максимумом ММП и пр.) Анализировались различные группы событий: связанные и не связанные с ударной волной; рекуррентные, обусловленные областями коронального взаимодействия (coronal interaction region, CIR), и спорадические, вызванные межпланетными возмущениями (ICME); смешанные события. Было показано, что время между началом ФП и началом возрастания ММП одинаково для всех исследуемых групп событий; ФП в группе CIR характеризуются большим временным интервалом между минимумом интенсивности КЛ и максимумом ММП, чем в группе ICME.

Результаты исследования количества и величины ФП на разных фазах солнечной активности также представлены во многих работах [Мелкумян и др., 2018б; Belov et al., 2005; Belov, 2009; Lingri et al., 2016; Storini et al., 1997; Thakur, 2015]. Сравнение количества ФП разной величины (больше 3 % и больше 5 %) для солнечных циклов с 19-го по 23-й проводилось в работе [Belov, 2009]. В частности, было получено, что большие ФП наблюдались в цикле 23 чаще, чем в любом другом цикле исследуемого периода; они очень часто происходили сериями,

и каждая серия была связана со всплеском солнечной активности. В работе [Thakur, 2015] были представлены результаты исследования статистической связи параметров ФП, вызванных магнитными облаками (magnetic clouds, MCs), с параметрами солнечного ветра в 23-м и 24-м солнечных циклах. Было показано, что 31 % ФП в цикле 23 и только 17 % ФП в цикле 24 имели величину больше 3 %; 22 % MCs в цикле 23 и только 10 % MCs в цикле 24 имели максимальную магнитную индукцию больше 20 нТл. Таким образом, MCs в цикле 24 имеют более слабое магнитное поле, чем в цикле 23, и ожидаемо вызывают более слабые ФП. Анализ ФП достаточно большой величины (больше 2 % для жесткости 10 ГВ) в период глубокого минимума между циклами 23 и 24, а также на фазе возрастания солнечной активности и в максимуме цикла 24 проводился в работе [Lingri et al., 2016]. Было показано, что ФП величиной больше 2 % ассоциируются с быстрыми ICMEs и ударными волнами, которые они создают; фаза возрастания 24-го цикла характеризуется достаточно большим количеством ФП, но среди них нет крупных событий.

В настоящей работе мы не только сравниваем ФП, связанные с двумя различными типами солнечных источников (СН и СМЕ), но и проводим сравнительный анализ рекуррентных и спорадических ФП в разных солнечных циклах и на различных фазах солнечной активности. Физический смысл любого явления может быть выявлен тем надежнее, чем больше сведений, в том числе и статистических, имеется об этом явлении. Несмотря на длительное изучение ФП и большое количество статей о них, надежной статистической информации о ФП не так много. Цель настоящего исследования — получение, накопление и уточнение таких сведений. В нашу задачу входило: сравнение параметров форбуш-понижений и вызвавших их крупномасштабных возмущений солнечного ветра для двух групп событий (связанных с корональными дырами и с корональными выбросами массы) на разных фазах солнечной активности в двух последних солнечных циклах. Достаточно большой объем исходных данных позволил использовать статистические методы для решения этой задачи.

## ДААННЫЕ И МЕТОДЫ

В настоящей работе использовались параметры ФП из созданной и поддерживаемой сотрудниками ИЗМИРАН базы данных форбуш-эффектов и межпланетных возмущений (Forbush Effects and Interplanetary Disturbances, FEID) [<http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html>]. База данных FEID содержит информацию о ФП с 1957 г. Параметры ФП получены по данным мировой сети нейтронных мониторов с использованием метода глобальной съемки для частиц с жесткостью 10 ГВ [Белов и др., 2018; Belov et al., 2018]. База данных FEID содержит также информацию о параметрах солнечной активности, межпланетной среды и геомагнитных возмущений. Информация о солнечных вспышках получена по измерениям спутников GOES [<http://www.swpc.noaa.gov/ftpdir/lists/xray>]. Информация о параметрах солнечного ветра взята из базы данных OMNI [<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>].

Сравнение ФП, обусловленных ICMEs и высокоскоростными потоками солнечной плазмы из коро-

нальных дыр, предполагает, что каждое анализируемое событие развивается под действием одного источника. Мы постарались выделить такие события, выбрав из базы данных ФП, начало которых отдалено от последующего события не менее чем на 36 ч и от предыдущего события как минимум на 60 ч (если предыдущее событие имело величину больше 1.4 %). Для выделения рекуррентных и спорадических ФП среди таких событий, т. е. для привязки ФП к солнечному источнику, применялся комплексный анализ солнечных и межпланетных данных [Belov, 2009; Мелкумян и др., 2018a]. При этом использовались данные коронографов, снимки и видеоизображения Солнца, базы данных и каталоги: [Richardson, Cane, 2010; Tlatov et al., 2014; [http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icme\\_table2.htm](http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icme_table2.htm); [http://www.solen.info/solar/coronal\\_holes.html](http://www.solen.info/solar/coronal_holes.html); [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list)]. Поскольку уверенное отождествление удается провести только тогда, когда есть достаточно полные и надежные данные, то все отобранные нами события с установленными солнечными источниками относятся к сравнительно недавнему периоду (с начала 1997 г.).

В настоящей работе для сравнения свойств форбуш-понижений использовались три группы событий: группа FULL (ФП, вызванные только одним солнечным источником, 1677 событий с мая 1996 по декабрь 2015 г.); группа СН (рекуррентные ФП, связанные с корональными дырами, 350 событий); группа СМЕ (спорадические ФП, связанные с корональными выбросами массы, 207 событий). Для исследования зависимости ФП от фазы солнечной активности внутри каждой группы выбирались подгруппы событий: SC 23 (23-й солнечный цикл); SC 24 (24-й солнечный цикл); SC 23–24 (23-й и 24-й солнечные циклы), Max 23 (максимум 23-го солнечного цикла); Min 23–24 (минимум между 23-м и 24-м солнечными циклами); Max 24 (максимум 24-го солнечного цикла). В качестве параметров, описывающих каждое событие, использовались максимальные за время ФП значения магнитной индукции ММП ( $B_{max}$ ), скорости солнечного ветра ( $V_{max}$ ), вариации плотности КЛ (величина ФП  $A_F$ ), экваториальной составляющей анизотропии КЛ ( $A_{xy\ max}$ ) и модуля почасового уменьшения вариации плотности КЛ ( $D_{min}$ ). Использовались также параметры, характеризующие временное развитие события, а именно интервалы времени между началом возмущения и максимальными значениями: вариации плотности КЛ (продолжительность главной фазы ФП  $T_{min}$ ), экваториальной составляющей анизотропии КЛ ( $T_{Axy\ max}$ ) и модуля почасового уменьшения плотности КЛ ( $T_{Dmin}$ ). Достаточно большой объем данных позволил применять статистические методы для исследования перечисленных выше параметров в различных группах и подгруппах событий: строились гистограммы, вычислялись средние значения, медианы, 25%-й и 75%-й квартили распределений [Corder, Foreman, 2009].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 представлены количество ФП и параметры распределения величины ФП для всех событий

Таблица 1

Статистические параметры распределения величины ФП в максимуме цикла 23, минимуме между циклами 23–24 и максимуме цикла 24 для событий, вызванных как одним, так и несколькими солнечными источниками

| Период солнечной активности | Начало | Конец | Количество ФП | Величина ФП, %   |         |     |      |
|-----------------------------|--------|-------|---------------|------------------|---------|-----|------|
|                             |        |       |               | Среднее значение | Медиана | Min | Max  |
| Max 23                      | 1999   | 2002  | 513           | 2.41±0.10        | 1.7     | 0.3 | 16.0 |
| Min 23–24                   | 2006   | 2010  | 425           | 1.32±0.04        | 1.1     | 0.3 | 12.1 |
| Max 24                      | 2012   | 2015  | 511           | 1.85±0.07        | 1.4     | 0.4 | 14.8 |

Таблица 2

Медиана, границы межквартильного интервала (25 % – 75 %), минимальное и максимальное значения параметров ФП и межпланетной среды в группах FULL (ФП, вызванные только одним солнечным источником), СН (рекуррентные ФП), СМЕ (спорадические ФП)

| Параметры         | Группа | Med  | 25%–75%   | Min  | Max  |
|-------------------|--------|------|-----------|------|------|
| $A_F$ , %         | FULL   | 1.1  | 0.8–1.7   | 0.3  | 13.8 |
|                   | СН     | 1.1  | 0.8–1.5   | 0.4  | 3.6  |
|                   | СМЕ    | 2.1  | 1.1–4.0   | 0.3  | 13.8 |
| $ D_{min} $ , %/ч | FULL   | 0.26 | 0.21–0.35 | 0.10 | 4.06 |
|                   | СН     | 0.25 | 0.21–0.30 | 0.11 | 1.02 |
|                   | СМЕ    | 0.41 | 0.28–0.64 | 0.15 | 4.06 |
| $A_{xy max}$ , %  | FULL   | 1.12 | 0.90–1.43 | 0.44 | 5.26 |
|                   | СН     | 0.99 | 0.83–1.18 | 0.47 | 2.43 |
|                   | СМЕ    | 1.62 | 1.21–2.09 | 0.56 | 5.26 |
| $V_{max}$ , км/с  | FULL   | 487  | 421–586   | 296  | 959  |
|                   | СН     | 565  | 481–643   | 331  | 907  |
|                   | СМЕ    | 492  | 428–582   | 327  | 959  |
| $B_{max}$ , нТл   | FULL   | 10.4 | 8.0–13.5  | 3.7  | 65.6 |
|                   | СН     | 11.2 | 9.0–13.8  | 4.3  | 24.9 |
|                   | СМЕ    | 13.8 | 9.7–20.2  | 4.7  | 65.6 |

Примечание.  $A_F$  — величина ФП;  $|D_{min}|$  — максимальное за время события значение модуля почасового уменьшения плотности КЛ;  $A_{xy max}$  — максимальная за время события экваториальная составляющая анизотропии КЛ;  $V_{max}$  — максимальная за время события скорость солнечного ветра;  $B_{max}$  — максимальная за время события индукция ММП

на разных фазах солнечной активности в двух последних солнечных циклах. В количестве и величине ФП проявляется солнечная цикличность: в годы высокой солнечной активности они сильнее, чем при низкой солнечной активности (в максимумах циклов 23 и 24 медианы распределения величины ФП равны 1.7 % и 1.4 %, в минимуме между циклами — 1.1 %; количество ФП — 513, 511 и 425 соответственно).

В табл. 2 представлены статистические характеристики параметров ФП и солнечного ветра в группах FULL, СН и СМЕ. Для всех параметров, кроме скорости солнечного ветра, медиана и межквартильный размах значимо больше в группе СМЕ, чем в группе СН. Для параметров  $A_{xy max}$  и  $|D_{min}|$  эта разница проявляется особенно ярко: 25%-й квартиль распре-

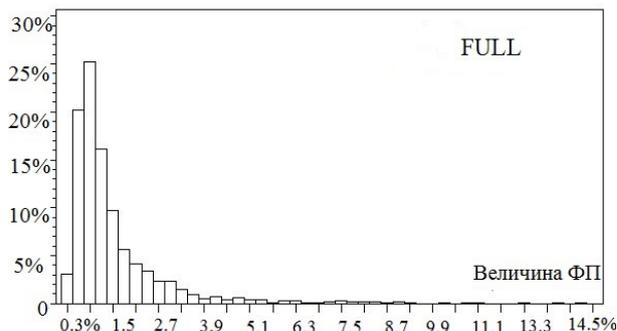


Рис. 1. Распределение величины ФП, % для событий группы FULL, %

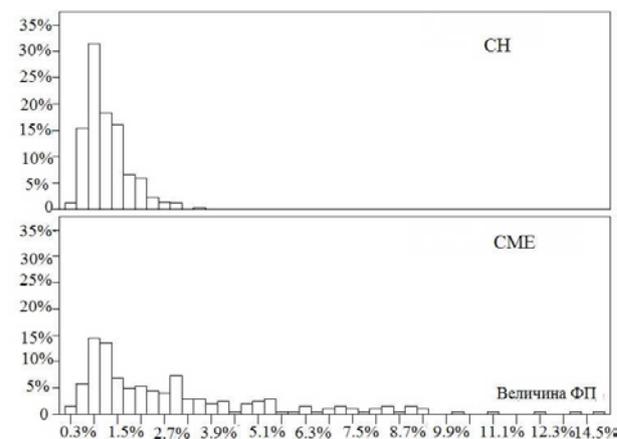


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для событий групп СН (вверху) и СМЕ (внизу)

деления в группе СМЕ и 75%-й квартиль в группе СН практически совпадают. Таким образом, распределения параметров рекуррентных и спорадических событий существенно отличаются друг от друга. Для скорости солнечного ветра медиана больше в группе СН (565 км/с), чем в группе СМЕ (492 км/с); межквартильный интервал немного шире в группе СН (481–643 км/с), чем в группе СМЕ (428–582 км/с), но максимальное значение скорости солнечного ветра в целом больше в группе СН, но самые быстрые межпланетные неоднородности связаны с СМЕ.

На рис. 1, 2 представлены гистограммы величины ФП в группах событий FULL, СН и СМЕ, а на рис. 3 — гистограммы величины ФП для минимума солнечной активности между циклами 23 и 24 и для максимума цикла 23. Все распределения характеризуются положительной асимметрией; распределения для групп FULL и СН и для минимума солнечной активности островершинные; распределения для группы СМЕ и максимума цикла 23 более плосковершинные; распределения для групп FULL и СМЕ и для максимума цикла 23 имеют длинные хвосты в области больших значений (наличие хвоста распределения в области больших значений является признаком спорадических ФП [Мелкумян и др., 2018в]). Поскольку положительную асимметрию имеют распределения, соответствующие логнормальному закону, мы проверили гипотезу о логнор-

Таблица 3

Количество событий и средние значения параметров ФП и межпланетной среды

|                    | SC 23            |                  | Max 23           |                  |
|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                    | CH               | CME              | CH               | CME              |
| $N$                | 212              | 136              | 34               | 70               |
| $A_F$ , %          | $1.27 \pm 0.04$  | $3.20 \pm 0.24$  | $1.40 \pm 0.12$  | $3.23 \pm 0.33$  |
| $ D_{\min} $ , %/ч | $0.27 \pm 0.01$  | $0.60 \pm 0.05$  | $0.24 \pm 0.01$  | $0.53 \pm 0.05$  |
| $A_{xy \max}$ , %  | $1.05 \pm 0.02$  | $1.90 \pm 0.08$  | $1.26 \pm 0.07$  | $1.94 \pm 0.09$  |
| $T_{\min}$ , ч     | $23.1 \pm 1.2$   | $15.6 \pm 1.08$  | $21.9 \pm 2.8$   | $14.9 \pm 1.6$   |
| $T_{D\min}$ , ч    | $17.6 \pm 0.9$   | $9.1 \pm 1.0$    | $17.6 \pm 2.4$   | $8.3 \pm 1.4$    |
| $T_{Axy \max}$ , ч | $20.0 \pm 1.1$   | $16.3 \pm 1.2$   | $26.8 \pm 3.0$   | $16.0 \pm 1.6$   |
| $V_{\max}$ , км/с  | $593 \pm 7$      | $539 \pm 11$     | $560 \pm 16$     | $524 \pm 12$     |
| $B_{\max}$ , нТл   | $12.54 \pm 0.24$ | $17.56 \pm 0.85$ | $12.69 \pm 0.57$ | $17.00 \pm 1.02$ |
|                    | SC 24            |                  | Min 23–24        |                  |
|                    | CH               | CME              | CH               | CME              |
| $N$                | 138              | 71               | 165              | 25               |
| $A_F$ , %          | $1.14 \pm 0.04$  | $2.74 \pm 0.29$  | $1.19 \pm 0.04$  | $1.89 \pm 0.40$  |
| $ D_{\min} $ , %/ч | $0.27 \pm 0.01$  | $0.54 \pm 0.05$  | $0.27 \pm 0.01$  | $0.39 \pm 0.06$  |
| $A_{xy \max}$ , %  | $1.02 \pm 0.02$  | $1.61 \pm 0.07$  | $0.92 \pm 0.02$  | $1.29 \pm 0.15$  |
| $T_{\min}$ , ч     | $21.5 \pm 1.4$   | $18.41 \pm 1.48$ | $25.5 \pm 1.2$   | $23.6 \pm 2.7$   |
| $T_{D\min}$ , ч    | $16.0 \pm 1.3$   | $10.4 \pm 1.4$   | $16.4 \pm 1.1$   | $16.0 \pm 2.6$   |
| $T_{Axy \max}$ , ч | $16.5 \pm 1.3$   | $13.2 \pm 1.5$   | $19.1 \pm 1.3$   | $20.5 \pm 2.9$   |
| $V_{\max}$ , км/с  | $529 \pm 9$      | $489 \pm 13$     | $559 \pm 8$      | $459 \pm 26$     |
| $B_{\max}$ , нТл   | $10.47 \pm 0.27$ | $13.89 \pm 0.92$ | $11.17 \pm 0.26$ | $10.52 \pm 0.75$ |
|                    | SC 23–24         |                  | Max 24           |                  |
|                    | CH               | CME              | CH               | CME              |
| $N$                | 350              | 207              | 47               | 39               |
| $A_F$ , %          | $1.22 \pm 0.03$  | $3.04 \pm 0.18$  | $1.26 \pm 0.09$  | $3.31 \pm 0.45$  |
| $ D_{\min} $ , %/ч | $0.27 \pm 0.01$  | $0.58 \pm 0.04$  | $0.30 \pm 0.02$  | $0.61 \pm 0.07$  |
| $A_{xy \max}$ , %  | $1.04 \pm 0.02$  | $1.80 \pm 0.06$  | $1.21 \pm 0.05$  | $1.83 \pm 0.10$  |
| $T_{\min}$ , ч     | $22.5 \pm 0.9$   | $16.5 \pm 0.9$   | $16.0 \pm 2.5$   | $16.5 \pm 2.0$   |
| $T_{D\min}$ , ч    | $16.9 \pm 0.8$   | $9.5 \pm 0.8$    | $19.1 \pm 2.4$   | $7.6 \pm 1.7$    |
| $T_{Axy \max}$ , ч | $18.7 \pm 0.9$   | $15.2 \pm 0.9$   | $16.4 \pm 2.4$   | $10.4 \pm 1.8$   |
| $V_{\max}$ , км/с  | $568 \pm 6$      | $522 \pm 9$      | $549 \pm 16$     | $510 \pm 18$     |
| $B_{\max}$ , нТл   | $11.73 \pm 0.19$ | $16.31 \pm 0.65$ | $11.03 \pm 0.43$ | $15.25 \pm 1.22$ |

Примечание.  $N$  — количество событий;  $A_F$  — величина ФП;  $|D_{\min}|$ ,  $A_{xy \max}$  — максимальные за время события значения модуля почасового уменьшения плотности КЛ и экваториальной составляющей анизотропии КЛ;  $T_{\min}$  — продолжительность основной фазы ФП;  $T_{D\min}$ ,  $T_{Axy \max}$  — время между началом ФП и максимальными за событие значениями модуля почасового уменьшения плотности КЛ и экваториальной анизотропии КЛ;  $V_{\max}$  и  $B_{\max}$  — максимальные за время события скорость солнечного ветра и индукция ММП

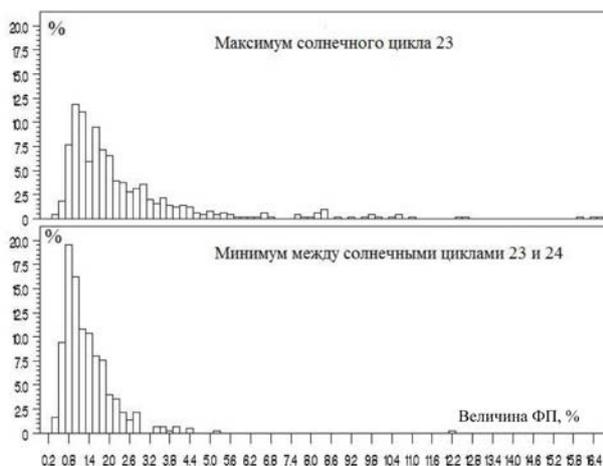


Рис. 3. Распределения величины ФП для минимума солнечной активности между циклами 23 и 24 и для максимума цикла 23

мальности распределений величины ФП, используя тест Колмогорова—Смирнова, и получили отрицательный результат. Сравнение гистограмм на рис. 2, 3

позволяет сделать вывод, что ФП в минимуме солнечной активности имеют в основном рекуррентный, а в максимуме солнечного цикла 23 — преимущественно спорадический характер.

В табл. 3 и на рис. 4–8 представлены средние значения, а в табл. 4 — медианные, минимальные и максимальные значения параметров ФП и солнечного ветра в группах CH и CME для солнечных циклов 23 и 24. Из табл. 3, 4 и рис. 4–6 следует, что параметры ФП (величина ФП, максимальные значения модуля почасового уменьшения плотности КЛ и экваториальной составляющей анизотропии КЛ) для спорадических событий в среднем выше, чем для рекуррентных, на всех фазах солнечной активности. В минимуме солнечной активности разница между средними значениями параметров ФП двух групп существенно меньше, чем в максимумах (особенно величины ФП). Средняя величина ФП в группе CME практически одинакова в максимумах 23-го и 24-го циклов и значительно меньше в минимуме между циклами. В группе CH средние значения величины ФП близки на всех фазах солнечной активности, что,



Рис. 4. Среднее значение величины ФП в максимумах 23-го и 24-го солнечных циклов и в минимуме между ними

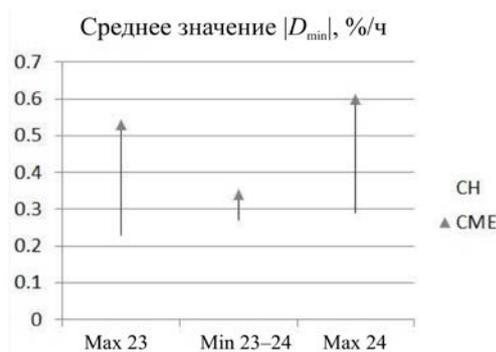


Рис. 5. То же, что на рис. 4, для максимального значения модуля почасового уменьшения плотности КЛ

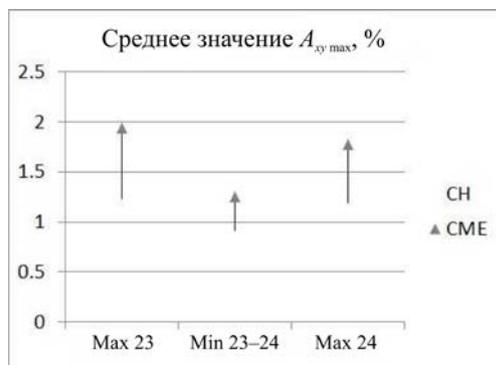


Рис. 6. То же для максимальной экваториальной составляющей анизотропии



Рис. 7. То же для максимальной индукции ММП

по-видимому, связано с малым изменением основных характеристик и геоэффективности низкоширотных корональных дыр. Данные табл. 3 и 4 показывают, что скорость солнечного ветра в среднем выше

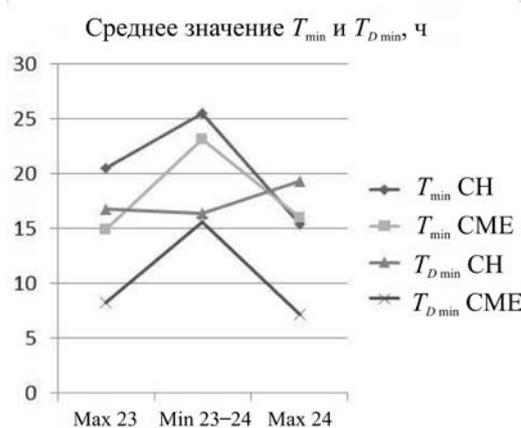


Рис. 8. То же для продолжительности основной фазы ФП ( $T_{min}$ ) и времени от начала ФП до момента регистрации максимального значения модуля почасового уменьшения плотности КЛ ( $T_{Dmin}$ )

для 23-го цикла, чем для 24-го; на всех фазах солнечной активности средняя скорость солнечного ветра больше для рекуррентных событий, чем для спорадических; разница между скоростями двух групп событий существенно больше в минимуме солнечной активности (медианные значения 567 и 408 км/с соответственно). При этом для рекуррентных событий медианное значение скорости в минимуме солнечной активности больше, чем в максимумах, а для спорадических событий — наоборот. Таким образом, в минимуме солнечной активности рекуррентные ФП связаны большей частью с высокоскоростными потоками частиц, а спорадические ФП вызываются в основном ICMEs с низкими скоростями.

По данным табл. 3, 4 и рис. 7 разница между значениями максимальной в течение ФП индукции ММП для рекуррентных и спорадических событий в минимуме между циклами 23 и 24 статистически незначима. Для спорадических событий медианное значение индукции ММП в максимумах циклов 23 (14.4 нТл) и 24 (13.1 нТл) больше, чем в минимуме между циклами (9.9 нТл); средние значения индукции магнитного поля ICMEs в текущем цикле ( $13.89 \pm 0.92$  нТл) меньше, чем в предыдущем ( $17.56 \pm 0.85$  нТл). Одно из возможных объяснений ослабления магнитного поля межпланетных возмущений дано в работе [Gopalswamy et al., 2015], где представлен сравнительный анализ параметров CMEs и объясняется разница между их геоэффективностью в 23-м и 24-м солнечных циклах. Более спокойная космическая погода в 24-м цикле является следствием аномального расширения CMEs, вызванного низким давлением невозмущенного солнечного ветра во внутренней гелиосфере.

В табл. 3 и на рис. 8 представлены средние значения временных характеристик ФП для рекуррентных и спорадических событий на разных фазах солнечной активности. Из таблицы и рисунка видно, что продолжительность основной фазы ФП ( $T_{min}$ ) внутри каждой группы событий (CH и CME) значимо меньше в максимумах 23-го и 24-го циклов, чем в минимуме между циклами. Средние значения  $T_{min}$  существ-

Таблица 4

Количество событий, медианные (Med), минимальные (Min) и максимальные (Max) значения параметров ФП и межпланетной среды

|                    | SC 23    |      |      |      |      |      | Max 23    |      |      |      |      |      |
|--------------------|----------|------|------|------|------|------|-----------|------|------|------|------|------|
|                    | CH       |      |      | CME  |      |      | CH        |      |      | CME  |      |      |
| <i>N</i>           | 212      |      |      | 136  |      |      | 34        |      |      | 70   |      |      |
|                    | Med      | Min  | Max  | Med  | Min  | Max  | Med       | Min  | Max  | Med  | Min  | Max  |
| $A_F$ , %          | 1.2      | 0.4  | 3.6  | 2.1  | 0.3  | 13.8 | 1.2       | 0.6  | 3.6  | 2.2  | 0.6  | 13.8 |
| $ D_{\min} $ , %/ч | 0.25     | 0.11 | 0.80 | 0.41 | 0.15 | 4.06 | 0.22      | 0.11 | 0.47 | 0.36 | 0.15 | 2.10 |
| $A_{xy \max}$ , %  | 1.02     | 0.48 | 2.43 | 1.67 | 0.56 | 5.26 | 1.17      | 0.61 | 2.43 | 1.78 | 0.92 | 4.41 |
| $V_{\max}$ , км/с  | 605      | 354  | 874  | 511  | 327  | 959  | 543       | 419  | 769  | 512  | 327  | 774  |
| $B_{\max}$ , нТл   | 12.0     | 6.1  | 24.9 | 14.9 | 4.9  | 65.6 | 12.0      | 6.9  | 21.1 | 14.4 | 7.5  | 65.6 |
|                    | SC 24    |      |      |      |      |      | Min 23-24 |      |      |      |      |      |
|                    | CH       |      |      | CME  |      |      | CH        |      |      | CME  |      |      |
| <i>N</i>           | 138      |      |      | 71   |      |      | 165       |      |      | 25   |      |      |
|                    | Med      | Min  | Max  | Med  | Min  | Max  | Med       | Min  | Max  | Med  | Min  | Max  |
| $A_F$ , %          | 1.0      | 0.5  | 3.0  | 2.0  | 0.3  | 13.1 | 1.1       | 0.5  | 2.9  | 1.3  | 0.3  | 10.2 |
| $ D_{\min} $ , %/ч | 0.24     | 0.14 | 1.02 | 0.38 | 0.15 | 2.35 | 0.25      | 0.13 | 0.80 | 0.31 | 0.15 | 1.56 |
| $A_{xy \max}$ , %  | 0.97     | 0.47 | 2.38 | 1.58 | 0.66 | 3.27 | 0.92      | 0.47 | 1.61 | 1.06 | 0.56 | 4.35 |
| $V_{\max}$ , км/с  | 515      | 331  | 907  | 453  | 336  | 737  | 567       | 331  | 777  | 408  | 342  | 896  |
| $B_{\max}$ , нТл   | 9.7      | 4.3  | 21.0 | 11.3 | 4.7  | 40.1 | 10.5      | 4.3  | 21.7 | 9.9  | 4.9  | 19.2 |
|                    | SC 23-24 |      |      |      |      |      | Max 24    |      |      |      |      |      |
|                    | CH       |      |      | CME  |      |      | CH        |      |      | CME  |      |      |
| <i>N</i>           | 350      |      |      | 207  |      |      | 47        |      |      | 39   |      |      |
|                    | Med      | Min  | Max  | Med  | Min  | Max  | Med       | Min  | Max  | Med  | Min  | Max  |
| $A_F$ , %          | 1.1      | 0.4  | 3.6  | 2.1  | 0.3  | 13.8 | 1.1       | 0.5  | 3.0  | 2.8  | 0.5  | 13.1 |
| $ D_{\min} $ , %/ч | 0.25     | 0.11 | 1.02 | 0.41 | 0.15 | 4.06 | 0.28      | 0.17 | 1.02 | 0.49 | 0.20 | 2.35 |
| $A_{xy \max}$ , %  | 0.99     | 0.47 | 2.43 | 1.62 | 0.56 | 5.26 | 1.17      | 0.54 | 2.38 | 1.78 | 0.83 | 3.27 |
| $V_{\max}$ , км/с  | 565      | 331  | 907  | 492  | 327  | 959  | 542       | 369  | 907  | 483  | 336  | 737  |
| $B_{\max}$ , нТл   | 11.2     | 4.3  | 24.9 | 13.8 | 4.7  | 65.6 | 10.8      | 5.3  | 19.6 | 13.1 | 5.8  | 40.1 |

Примечание.  $N$  — количество событий;  $A_F$  — величина ФП;  $|D_{\min}|$  — максимальный за время события модуль почасового уменьшения плотности КЛ;  $A_{xy \max}$  — максимальная за время события экваториальная составляющая анизотропии КЛ;  $V_{\max}$  — максимальная за время события скорость солнечного ветра;  $B_{\max}$  — максимальная за время события индукция ММП

венно меньше для спорадических событий, чем для рекуррентных, в максимуме 23-го цикла и практически одинаковы для двух групп событий в минимуме между циклами и в максимуме 24-го цикла. В работах [Абунин и др., 2012; Мелкумян и др., 2018a; Belov, 2009] было показано, что спорадические ФП развиваются быстрее, чем рекуррентные. Настоящее исследование позволяет уточнить это утверждение: спорадические события развиваются существенно быстрее, чем рекуррентные, в максимуме цикла 23; основная фаза ФП длится почти одинаково для спорадических и рекуррентных событий в минимуме между циклами 23 и 24 и в максимуме цикла 24.

## ВЫВОДЫ

Использование статистических методов для сравнения форбуш-понижений от двух типов солнечных источников (CH и CME) на разных фазах солнечной активности в двух последних солнечных циклах позволило сделать следующие выводы:

1. В ФП проявляется солнечная цикличность: в годы высокой солнечной активности медиана распределения величины ФП значимо выше, чем при низкой активности.

2. Распределения параметров ФП и солнечного ветра существенно различаются для событий, вызванных ICMEs (спорадические ФП) и высокоскоростными потоками плазмы из корональных дыр

(рекуррентные ФП). Для рекуррентных событий средняя величина ФП слабо зависит от фазы солнечной активности. По-видимому, это говорит о том, что основные характеристики и геоэффективность низкоширотных корональных дыр мало меняются в солнечных циклах.

3. ФП в минимуме солнечной активности между солнечными циклами 23 и 24 в основном вызваны высокоскоростными потоками солнечного ветра из корональных дыр, а в максимуме солнечного цикла 23 — межпланетными неоднородностями, связанными с корональными выбросами массы.

4. В солнечных циклах 23 и 24 на всех фазах солнечной активности параметры ФП (величина ФП, максимальные значения модуля почасового уменьшения плотности КЛ и экваториальной составляющей анизотропии КЛ) значимо больше для спорадических, чем для рекуррентных ФП. При этом в максимумах солнечной активности разница между параметрами двух групп существенно больше, чем в минимуме.

5. Магнитная индукция ММП в среднем значительно больше для спорадических, чем для рекуррентных ФП, в максимумах солнечных циклов 23 и 24 и практически одинакова для двух типов событий в минимуме между циклами. Значение индукции ММП для спорадических событий существенно меньше в цикле 24, чем в цикле 23, т. е. магнитные

поля ICMEs в текущем цикле слабее, чем в предыдущем, что, возможно, является следствием аномального расширения CMEs, вызванного низким давлением невозмущенного солнечного ветра во внутренней гелиосфере.

6. Скорость солнечного ветра на всех фазах солнечной активности в среднем значимо больше для рекуррентных событий, чем для спорадических, хотя максимальные скорости наблюдаются в группе событий, связанных с ICMEs. Скорость солнечного ветра для спорадических событий значимо больше в максимумах циклов 23 и 24, а для рекуррентных событий — немного больше в минимуме между циклами. По-видимому, в минимуме солнечной активности рекуррентные ФП связаны большей частью с высокоскоростными потоками солнечного ветра, а спорадические ФП вызываются в основном ICMEs с низкими скоростями. В целом скорость солнечного ветра и в рекуррентных, и в спорадических событиях в текущем цикле ниже, чем в предыдущем.

7. Анализ средних значений продолжительности основной фазы ФП показал: а) в максимуме цикла 23 спорадические события развиваются значительно быстрее, чем рекуррентные; б) в максимуме цикла 24 и в минимуме между циклами развитие во времени рекуррентных и спорадических событий примерно одинаково; в) продолжительность основной фазы ФП внутри каждой группы событий больше в минимуме между циклами 23 и 24, чем в максимумах этих циклов.

Авторы благодарны коллективам мировой сети станций космических лучей, обеспечивающим данные непрерывной регистрации нейтронной компоненты [<http://cr0.izmiran.ru/ThankYou>], а также базе данных NMDB [<http://www.nmdb.eu>], созданной в рамках программы FP7 Европейского Союза (контракт № 213007), за предоставленные данные.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абунин А.А., Абунина М.А., Белов А.В. и др. Форбуш-эффекты с внезапным и постепенным началом // Геомагнетизм и аэронавигация. 2012. Т. 52, № 3. С. 313–320.

Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке Г.В. и др. Метод глобальной съемки для мировой сети нейтронных мониторов // Геомагнетизм и аэронавигация. 2018. Т. 58, № 3. С. 374–389. DOI: [10.7868/S0016794018030082](https://doi.org/10.7868/S0016794018030082).

Дорман Л.И. Вариации космических лучей и исследование космоса. М.: АН СССР, 1963. 1027 с.

Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А. и др. Основные свойства форбуш-эффектов, связанных с высокоскоростными потоками из корональных дыр // Геомагнетизм и аэронавигация. 2018а. Т. 58, № 2. С. 163–176.

Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А. и др. Долгопериодные изменения количества и величины форбуш-эффектов // Геомагнетизм и аэронавигация. 2018б. Т. 58, № 5. С. 638–647.

Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А. и др. Распределение форбуш-эффектов по величине // Геомагнетизм и аэронавигация. 2018в. Т. 58, № 6. С. 845–852.

Badriddin, Kumar A. Study of the cosmic-ray modulation during the passage of ICMEs and CIRs // Solar Phys. 2016. V. 291, N 2. P. 559–580. DOI: [10.1007/s11207-015-0843-4](https://doi.org/10.1007/s11207-015-0843-4).

Belov A.V. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena // Proc. IAU Symposium. 2009. N 257. P. 119–130.

Belov A.V., Buetikofer R., Eroshenko E.A., et al. Frequency of Forbush effects as an index of solar activity // Proc. 29<sup>th</sup> ICRC. 2005. V. 1. P. 375–378.

Belov A., Abunin A., Abunina M., et al. Coronal mass ejections and non-recurrent Forbush decreases // Solar Phys. 2014. V. 289, N 10. P. 3949–3960. DOI: [10.1007/s11207-014-0534-6](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0534-6).

Belov A.V., Eroshenko E.A., Yanke V.G., et al. The Global Survey Method applied to ground-level cosmic ray measurements // Solar Phys. 2018. V. 293, N 68. DOI: [10.1007/s11207-018-1277-6](https://doi.org/10.1007/s11207-018-1277-6).

Bhaskar A., Subramanian P., Vichare G. Relative contribution of the magnetic field barrier and solar wind speed in ICME-associated Forbush decreases // Astrophys. J. 2016. V. 828, N 2, article id. 104. 8 p. DOI: [10.3847/0004-637X/828/2/104](https://doi.org/10.3847/0004-637X/828/2/104).

Cane H.V. CMEs and Forbush decreases // Space Sci. Rev. 2000. V. 93, N 1-2. P. 55–77.

Chertok I.M., Abunin A.A., Belov A.V., Grechnev V.V. Dependence of Forbush-decrease characteristics on parameters of solar eruptions // J. Phys. Conf. Ser. 2013. V. 409, N 1. article id. 012150. DOI: [10.1088/1742-6596/409/1/012150](https://doi.org/10.1088/1742-6596/409/1/012150).

Corder G.W., Foreman D.I. Nonparametric Statistics for Non-Statisticians. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009. 264 p.

Dumbović M., Vršnak B., Čalogović J., Župan R. Cosmic ray modulation by different types of solar wind disturbances // Astron. Astrophys. 2012. V. 538, A28. DOI: [10.1051/0004-6361/201117710](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201117710).

Dumbović M., Vršnak B., Čalogović J. Forbush decrease prediction based on remote solar observations // Solar Phys. 2016. V. 291, N 1. P. 285–302. DOI: [10.1134/s11207-015-0819-4](https://doi.org/10.1134/s11207-015-0819-4).

Forbush S.E. On the effects in the cosmic-ray intensity observed during magnetic storms // Phys. Rev. 1937. V. 51. P. 1108–1109.

Gopalswamy N. Coronal mass ejections: a summary of recent results // Proc. 20<sup>th</sup> National Solar Physics Meeting, Papradno, Slovakia. 2010. P. 108–130.

Gopalswamy N., Akiyama S., Yashiro S., et al. The mild space weather in solar cycle 24 // ArXiv. URL: <https://arxiv.org/abs/1508.01603> (дата обращения 9 ноября 2018 г.).

Iucci N., Parisi M., Storini M., et al. Forbush decreases: origin and development in the interplanetary space // Nuovo Cimento C. 1979. V. 2 C. P. 1–52. DOI: [10.1007/BF02507712](https://doi.org/10.1007/BF02507712).

Kryakunova O., Tsepakina I., Nikolaevskiy N., et al. Influence of high-speed streams from coronal holes on cosmic ray intensity in 2007 // J. Phys. Conf. Ser. 2013. V. 409, N 1, article id. 012181. DOI: [10.1088/1742-6596/409/1/012181](https://doi.org/10.1088/1742-6596/409/1/012181).

Lingri D., Mavromichalaki H., Belov A., et al. Solar activity parameters and associated Forbush decreases during the minimum between cycles 23 and 24 and the ascending phase of cycle 24 // Solar Phys. 2016. V. 291, N 3. P. 1025–1041. DOI: [10.1007/s11207-016-0863-8](https://doi.org/10.1007/s11207-016-0863-8).

Lockwood J.A. Forbush decreases in the cosmic radiation // Space Sci. Rev. 1971. V. 12, N 5. P. 658–715. DOI: [10.1007/BF00173346](https://doi.org/10.1007/BF00173346).

Richardson I.G. Energetic particles and corotating interaction regions in the solar wind // Space Sci. Rev. 2004. V. 111, N 3. P. 267–376. DOI: [10.1023/B:SPAC.0000032689.62830.3e](https://doi.org/10.1023/B:SPAC.0000032689.62830.3e).

Richardson I., Cane H. Near-Earth interplanetary coronal mass ejections during solar cycle 23 (1996–2009): Catalog and summary of properties // Solar Phys. 2010. V. 264, N 1. P. 189–237. DOI: [10.1007/s11207-010-9568-6](https://doi.org/10.1007/s11207-010-9568-6).

Storini M., Massetti S., Antalova A. To forecast huge Forbush decreases during solar activity cycles // Proc. 25<sup>th</sup> ICRC. Durban, South Africa, 1997. V. 1, P. 409–412.

Thakur N. Smaller Forbush decreases in solar cycle 24: Effect of the weak CME field strength? // American Geophysical Union, Fall Meeting 2015. id. SH23A-2428.

Tlatov A., Vasil'eva V., Tavastsherna K. Coronal holes in solar cycles 21 to 23 // Solar Phys. 2014. V. 289, N 4. P. 1349–1358. DOI: [10.1007/s11207-013-0387-4](https://doi.org/10.1007/s11207-013-0387-4).

URL: <http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html> (дата обращения 9 октября 2018 г.).

URL: <http://www.swpc.noaa.gov/ftpdir/lists/xray> (дата обращения 9 октября 2018 г.).

URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html> (дата обращения 9 октября 2018 г.).

URL: <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm> (дата обращения 9 октября 2018 г.).

URL: [http://www.solen.info/solar/coronal\\_holes.html](http://www.solen.info/solar/coronal_holes.html) (дата обращения 9 октября 2018 г.).

URL: [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list) (дата обращения 9 октября 2018 г.).

URL: <http://cr0.izmiran.ru/ThankYou> (дата обращения 9 октября 2018 г.).

URL: <http://www.nmdb.eu> (дата обращения 9 октября 2018 г.).

## REFERENCES

Abunin A.A., Abunina M.A., Belov A.V., Eroshenko E.A., Oleneva V.A., Yanke V.G. Forbush effects with a sudden and gradual onset. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2012, vol. 52, no. 3, pp. 292–299. DOI: [10.1134/S0016793212039924](https://doi.org/10.1134/S0016793212039924).

Badruddin K.A. Study of the cosmic-ray modulation during the passage of ICMEs and CIRs. *Solar Phys*. 2016, vol. 291, no. 2, pp. 559–580. DOI: [10.1007/s11207-015-0843-4](https://doi.org/10.1007/s11207-015-0843-4).

Belov A.V. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena. *Proc. IAU Symposium*. 2009, no. 257, pp. 119–130.

Belov A.V., Buetikofer R., Eroshenko E.A., Flueckiger E.O., Gushchina R.T., Oleneva V.A., Yanke V.G. Frequency of Forbush effects as an index of solar activity. *Proc. 29<sup>th</sup> ICRC*. 2005. V. 1, P. 375–378.

Belov A., Abunin A., Abunina M., Eroshenko E., Oleneva V., Yanke V., Papaioannou A., Mavromichalaki H., Gopalswamy N., Yashiro S. Coronal mass ejections and non-recurrent Forbush decreases. *Solar Phys*. 2014, vol. 289, no. 10, pp. 3949–3960. DOI: [10.1007/s11207-014-0534-6](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0534-6).

Belov A.V., Eroshenko E.A., Yanke V.G., Oleneva V.A., Abunina M.A., Abunin A.A. Global Survey Method for the world network of neutron monitors. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2018, vol. 58, no. 3, pp. 356–372. DOI: [10.1134/S0016793218030039](https://doi.org/10.1134/S0016793218030039).

Belov A.V., Eroshenko E.A., Yanke V.G., Oleneva V.A., Abunina M.A., Abunin A.A., Papaioannou A., Mavromichalaki H. The Global Survey Method applied to ground-level cosmic ray measurements. *Solar Phys*. 2018, vol. 293, no. 68. DOI: [10.1007/s11207-018-1277-6](https://doi.org/10.1007/s11207-018-1277-6).

Bhaskar A., Subramanian P., Vichare G. Relative contribution of the magnetic field barrier and solar wind speed in ICME-associated Forbush decreases. *Astrophys. J*. 2016, vol. 828, no. 2, article id. 104, 8 p. DOI: [10.3847/0004-637X/828/2/104](https://doi.org/10.3847/0004-637X/828/2/104).

Cane H.V. CMEs and Forbush decreases. *Space Sci. Rev*. 2000, vol. 93, no. 1–2, pp. 55–77.

Chertok I.M., Abunin A.A., Belov A.V., Grechnev V.V. Dependence of Forbush-decrease characteristics on parameters of solar eruptions. *J. Phys. Conf. Ser.* 2013, vol. 409, no. 1, article id. 012150. DOI: [10.1088/1742-6596/409/1/012150](https://doi.org/10.1088/1742-6596/409/1/012150).

Corder G.W., Foreman D.I. Nonparametric Statistics for Non-Statisticians. New Jersey, John Wiley & Sons, 2009, 264 p.

Dorman L.I. *Variatsii kosmicheskikh luchei i issledovanie kosmosa* [Cosmic Ray Variation and Space Research]. Moscow, 1963. 1027 p. (In Russian). English edition: Dorman L.I. Cosmic Rays: Variations and Space Explorations. Amsterdam, North-Holland; New York, American Elsevier, 1974, 675 p.

Dumbović M., Vršnak B., Čalogović J., Župan R. Cosmic ray modulation by different types of solar wind disturbances. *Astron. Astrophys.* 2012, vol. 538, A28. DOI: [10.1051/0004-6361/201117710](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201117710).

Dumbović M., Vršnak B., Čalogović J. Forbush decrease prediction based on remote solar observations. *Solar Phys*. 2016, vol. 291, no. 1, pp. 285–302. DOI: [10.1134/s11207-015-0819-4](https://doi.org/10.1134/s11207-015-0819-4).

Forbush S.E. On the effects in the cosmic-ray intensity observed during magnetic storms. *Phys. Rev.* 1937, vol. 51, pp. 1108–1109.

Gopalswamy N. Coronal mass ejections: a summary of recent results. *Proc. 20<sup>th</sup> National Solar Physics Meeting, Papradno, Slovakia*. 2010, pp. 108–130.

Gopalswamy N., Akiyama S., Yashiro S., Xie H., Mäkelä P., Michalek G. The mild space weather in solar cycle 24. *ArXiv*. URL: <https://arxiv.org/abs/1508.01603> (accessed November 9, 2018).

Iucci N., Parisi M., Storini M., Villoresi G. Forbush decreases: origin and development in the interplanetary space. *Nuovo Cimento C*. 1979, vol. 2C, pp. 1–52. DOI: [10.1007/BF02507712](https://doi.org/10.1007/BF02507712).

Kryakunova O., Tsepakina I., Nikolaevskiy N., Malimbaev A., Belov A., Abunin A., Abunina M., Eroshenko E., Oleneva V., Yanke V. Influence of high-speed streams from coronal holes on cosmic ray intensity in 2007. *J. Phys. Conf. Ser.* 2013, vol. 409, no. 1, article id. 012181. DOI: [10.1088/1742-6596/409/1/012181](https://doi.org/10.1088/1742-6596/409/1/012181).

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*. 2016, vol. 291, no. 3, pp. 1025–1041. DOI: [10.1007/s11207-016-0863-8](https://doi.org/10.1007/s11207-016-0863-8).

Lockwood J.A. Forbush decreases in the cosmic radiation. *Space Sci. Rev.* 1971, vol. 12, no. 5, pp. 658–715. DOI: [10.1007/BF00173346](https://doi.org/10.1007/BF00173346).

Melkumyan A.A., Belov A.V., Abunina M.A., Abunin A.A., Eroshenko E.A., Oleneva V.A., Yanke V.G. Main properties of Forbush effects related to high-speed streams from coronal holes. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2018a, vol. 58, no. 2, pp. 154–168. DOI: [10.1134/s0016793218020159](https://doi.org/10.1134/s0016793218020159).

Melkumyan A.A., Belov A.V., Abunina M.A., Abunin A.A., Eroshenko E.A., Oleneva V.A., Yanke V.G. Long term changes in the number and magnitude of Forbush effects. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2018b, vol. 58, no. 5, pp. 615–624. DOI: [10.1134/s0016793218050109](https://doi.org/10.1134/s0016793218050109).

Melkumyan A.A., Belov A.V., Abunina M.A., Abunin A.A., Eroshenko E.A., Oleneva V.A., Yanke V.G. Size distribution of Forbush effects. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2018c, vol. 58, no. 6, pp. 809–816. DOI: [10.1134/s0016793218050109](https://doi.org/10.1134/s0016793218050109).

Richardson I.G. Energetic particles and corotating interaction regions in the solar wind. *Space Sci. Rev.* 2004, vol. 111, no. 3, pp. 267–376. DOI: [10.1023/B:SPAC.0000032689.62830.3e](https://doi.org/10.1023/B:SPAC.0000032689.62830.3e).

Richardson I., Cane H. Near-Earth interplanetary coronal mass ejections during solar cycle 23 (1996–2009): Catalog and summary of properties. *Solar Phys*. 2010, vol. 264, no. 1, pp. 189–237. DOI: [10.1007/s11207-010-9568-6](https://doi.org/10.1007/s11207-010-9568-6).

Storini M., Masetti S., Antalova A. To forecast huge Forbush decreases during solar activity cycles. *Proc. 25<sup>th</sup> ICRC*. 1997, vol. 1, pp. 409–412.

Thakur N. Smaller Forbush decreases in solar cycle 24: effect of the weak CME field strength? *American Geophysical Union, Fall Meeting 2015*. id. SH23A-2428.

Tlatov A., Vasil'eva V., Tavastsherna K. Coronal holes in solar cycles 21 to 23. *Solar Phys*. 2014, vol. 289, no. 4, pp. 1349–1358. DOI: [10.1007/s11207-013-0387-4](https://doi.org/10.1007/s11207-013-0387-4).

URL: <http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html> (accessed November 9, 2018).

URL: <http://www.swpc.noaa.gov/ftpdir/lists/xray> (accessed November 9, 2018).

URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html> (accessed November 9, 2018).

URL: <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm> (accessed November 9, 2018).

URL: [http://www.solen.info/solar/coronal\\_holes.html](http://www.solen.info/solar/coronal_holes.html) (accessed November 9, 2018).

URL: [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list) (accessed November 9, 2018).

URL: <http://cr0.izmiran.ru/ThankYou> (accessed November 9, 2018).

URL: <http://www.nmdb.eu> (accessed November 9, 2018).

*Как цитировать эту статью*

Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Рекуррентные и спорадические форбуш-понижения в 23 и 24 солнечных циклах. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 1. С. 39–47. DOI: [10.12737/szf-51201904](https://doi.org/10.12737/szf-51201904).