

2УДК 524.1.352+539.12

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЙ, СВЯЗАННЫХ С РАЗНЫМИ ТИПАМИ СОЛНЕЧНЫХ И МЕЖПЛАНЕТНЫХ ИСТОЧНИКОВ

© 2022 г. А. А. Мелкумян¹, *, А. В. Белов¹, **, М. А. Абунина¹,
Н. С. Шлык¹, А. А. Абуниин¹, В. А. Оленева¹, В. Г. Янке¹

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

*e-mail: amelkum@izmiran.ru

**e-mail: abelov@izmiran.ru

Поступила в редакцию 17.06.2021 г.

После доработки 31.08.2021 г.

Принята к публикации 24.09.2021 г.

По материалам созданной и поддерживаемой в ИЗМИРАН базы данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений исследовались Форбуш-понижения за период с 1997 по 2017 гг. — всего 1055 событий. С использованием статистических методов сравнивалось развитие Форбуш-понижений во времени для четырех групп событий: (1) связанные с корональными выбросами массы из активных областей и сопровождающиеся солнечными вспышками; (2) вызванные межпланетными возмущениями от волоконных выбросов из регионов за пределами активных областей; (3) обусловленные высокоскоростными потоками из корональных дыр; (4) вызванные двумя или более источниками с разными типами возмущений. Для сравнения использовались временные параметры развития Форбуш-понижений — время от начала события до момента регистрации: минимальной плотности космических лучей; максимального часового уменьшения плотности космических лучей; максимальной экваториальной анизотропии космических лучей; максимальной скорости солнечного ветра; максимальной индукции межпланетного магнитного поля; минимального *Dst*-индекса. Исследование распределений временных параметров и корреляции между ними показало, что развитие Форбуш-понижений во времени существенно различается для четырех исследуемых групп событий.

DOI: 10.31857/S0016794022010138

1. ВВЕДЕНИЕ

Форбуш-понижением (ФП) называют изменение плотности и анизотропии космических лучей (КЛ) в крупномасштабных возмущениях солнечного ветра [Forbush, 1937; Lockwood, 1971; Iucci et al., 1979a; Belov et al., 2001]. Как правило, во время ФП интенсивность галактических КЛ относительно быстро убывает, а за понижением следует более медленное восстановление. Форбуш-понижения достаточно разнообразны по своему проявлению, и причиной такого многообразия является целый ряд факторов: влияние различных солнечных источников (а также их изменчивость и комбинация), слияние событий, взаимодействие распространяющегося возмущения с гелиосферным токовым слоем и т.д. [Belov, 2009]. Характеристики ФП зависят от величины межпланетного магнитного поля (ММП), разности скорости распространения возмущения и фоновой скорости солнечного ветра, размеров меж-

планетного возмущения и т.д. В зависимости от типа источника возмущения межпланетной среды ФП можно разделить на спорадические, вызванные межпланетными корональными выбросами массы (*Interplanetary Coronal Mass Ejections* — ICMEs) [Cane, 2000] и рекуррентные, вызванные высокоскоростными потоками (*High Speed Stream* — HSS) из корональных дыр (*Coronal Holes* — CHs) [Richardson, 2004]. Механизм дополнительной модуляции КЛ в данных типах возмущений солнечного ветра различен: ФП от ICMEs имеют, как правило, более резкое понижение интенсивности [Parker, 1963; Lockwood, 1971; Belov, 2000]. Влияние различных типов возмущений межпланетной среды на модуляцию галактических КЛ изучалось во многих работах (напр., [Gopalswamy et al., 2009; Dumbovič et al., 2012; Черток и др., 2013; Chertok et al., 2013; Мелкумян и др., 2018; Melkumyan et al., 2019]).

Охарактеризовать отдельное ФП можно, используя амплитудные значения вариации плот-

ности, анизотропии и скорости уменьшения плотности КЛ, скорости солнечного ветра и индукции магнитного поля межпланетного источника модуляции КЛ. Но эти параметры не дают представления о временном развитии события, которое в общем можно охарактеризовать продолжительностью основной фазы ФП – фазы спада (время от начала ФП до минимума плотности КЛ) и продолжительностью фазы восстановления (время от минимума плотности КЛ до конца существенных изменений плотности, обусловленных данным межпланетным возмущением, или же до начала следующего события). Время восстановления зависит, прежде всего, от размеров возмущения, его скорости распространения в межпланетном пространстве, а также места попадания Земли в это возмущение. В работе [Lockwood et al., 1986] было показано, что время восстановления ФП практически не зависит от энергии (жесткости) частиц; его величина варьируется от 3 до 10 дней; фаза восстановления хорошо описывается экспоненциальным законом; среднее значение времени восстановления (5 дней) не меняется во время инверсии солнечного магнитного поля и на фазах подъема и спада солнечного цикла. В работах [Iucci et al., 1979b; Cane et al., 1994] отмечалось, что время восстановления зависит от гелиодолготы солнечного источника. В работе [Абунина и др., 2013] исследовалось развитие Форбуш-понижений с 1976 по 2010 гг. в зависимости от гелиодолготы солнечных вспышек, ассоциированных с источниками модуляции КЛ. Было показано, что: а) события от восточных источников имеют протяженную фазу спада (для далеких восточных источников – от суток до трех, для более близких – около суток), восстановление происходит медленно; б) ФП, связанные с центральными источниками, отличаются малым временем спада (несколько часов); в) события от западных источников небольшие, быстрые и короткие (понижение не успевает развиться полностью, так как Земля быстро выходит из возмущенной области). В работе [Papailiou et al., 2020] исследовалась зависимость от гелиодолготы источника больших ФП в трех группах событий с 1967 по 2017 гг.: западные (от 21° до 60°), восточные (от -60° до -21°) и центральные (от -20° до 20°). Результаты показали, что ФП, связанные с западными источниками, встречаются реже, имеют меньшую величину, более быстрое развитие и меньшую продолжительность, чем ФП, связанные с восточными и центральными источниками.

Кроме времени спада и времени восстановления, для описания профиля ФП можно использовать более подробные характеристики временного развития: время от начала ФП до момента регистрации максимального значения: часового уменьшения плотности КЛ, анизотропии КЛ, скорости солнечного ветра, индукции ММП

и т.д. В работе [Абунин и др., 2012] исследовалось поведение параметров временного развития ФП с 1957 по 2011 гг. для двух групп изолированных событий: события, начавшиеся с прихода к Земле межпланетной ударной волны, и события без ударной волны. Полученные результаты показали, что: а) длительность фазы спада достаточно близка в двух группах событий; б) максимальное часовое понижение плотности КЛ регистрируется значительно раньше в группе событий с ударной волной; в) максимум анизотропии КЛ для событий с ударной волной наблюдается до минимума плотности КЛ, для событий без ударной волны – после этого минимума, т.е. на фазе восстановления; г) максимум скорости солнечного ветра отстает от максимума ММП, особенно для событий с межпланетной ударной волной. В работе [Белов и др., 2016] исследовалось поведение перечисленных выше временных характеристик ФП и межпланетных возмущений для событий с внезапным началом (*Sudden Storm Commencement – SSC*) с 1957 по 2012 гг., разделенных на группы по величине изменения плотности КЛ в начале ФП. Было показано, что для событий с наибольшими начальными изменениями плотности среднее время до минимума плотности и среднее время до максимальной скорости понижения плотности КЛ имеют наименьшие значения (соответственно, 17.6 ± 1.0 и 3.6 ± 0.4 ч). Оказалось также, что для событий с внезапным началом длительность фазы спада (19.2 ± 0.5 ч) практически совпадает со временем от SSC до минимального значения геомагнитного *Dst*-индекса (~ 20 ч). В работе [Мелкумян и др., 2018] исследовалось временное развитие ФП, связанных с разными типами солнечных источников – корональными дырами и корональными выбросами массы (*Coronal Mass Ejections – CMEs*) – за период с 1997 по 2014 гг. Для двух групп ФП, связанных с разными типами солнечных источников, вычислялись средние значения интервалов времени от начала ФП до максимальных значений параметров ФП (вариации плотности КЛ, величины часового понижения плотности КЛ, вариации экваториальной анизотропии КЛ), и межпланетных возмущений (скорости солнечного ветра, индукции ММП). Анализ полученных результатов показал, что для двух групп событий наблюдается как сходство, так и различия во временном развитии ФП.

Таким образом, в более ранних работах либо исследовалась только длительность фазы спада и фазы восстановления [Iucci et al., 1979b; Lockwood et al., 1986; Cane et al., 1994; Абунина и др., 2013; Papailiou et al., 2020], либо сравнивались средние значения временных параметров для двух классов событий: ФП с внезапным и постепенным началом [Абунин и др., 2012; Белов и др. 2016] или ФП, связанные с корональными выбросами массы и корональными дырами [Мелкумян

и др., 2018]. Цель настоящей работы – на большом объеме данных исследовать различие временных параметров ФП для четырех групп событий, отличающихся типом солнечных источников: (1) ФП, связанные с СМЕs из активных областей, сопровождающимися солнечными вспышками (группа СМЕ1); (2) ФП, вызванные межпланетными возмущениями от волоконных выбросов из регионов за пределами активных областей (группа СМЕ2); (3) ФП, вызванные высокоскоростными потоками из корональных дыр (группа СН); (4) ФП, связанные с несколькими солнечными источниками (смешанные события – группа MIX). Учитывая, что исследуемые параметры не подчиняются нормальному закону [Melkumyan et al., 2019] и средние значения сильно смещены в сторону больших значений, мы поставили перед собой задачу сравнить именно распределения параметров.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В настоящей работе использовались данные из созданной и поддерживаемой в ИЗМИРАН базы данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений (*Forbush Effects and Interplanetary Disturbances* – FEID) (<http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html>). База данных содержит информацию о ФП (с 1957 г.), параметрах солнечного ветра (с 1964 г.), солнечной и геомагнитной активности. Представленные в базе данных почасовые значения вариаций плотности и анизотропии КЛ рассчитаны по данным мировой сети нейтронных мониторов методом глобальной съемки [Белов и др., 2018]. Результаты получены для частиц с жесткостью 10 ГВ, наиболее близкой к эффективной жесткости частиц, регистрируемых нейтронными мониторами. Почасовые значения параметров солнечного ветра взяты из базы данных OMNI [King and Papitashvili, 2005; (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>)]. Геомагнитные данные взяты из интернет-ресурса (<ftp://ftp.gfz-potsdam.de/pub/home/obs/kp-ar/wdc/>) и сетевой базы данных (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index.html>). Информация по солнечным вспышкам основана на рентгеновских измерениях серии спутников GOES (<http://www.swpc.noaa.gov/ftp-dir/lists/xray>).

Для сравнения развития во времени Форбуш-понижений, связанных с четырьмя типами источников (группы СМЕ1, СМЕ2, СН, MIX), использовались ФП из базы данных FEID с января 1997 г. по декабрь 2017 г., для которых сделана достаточно уверенная привязка к солнечному источнику (всего 1055 событий – группа FULL). В качестве параметров временного развития ФП использовалось время от начала ФП до момента регистрации: минимального значения плотности КЛ (T_{\min} – время спада, длительность основной

(главной) фазы ФП); максимальных значений часового уменьшения плотности КЛ ($T_{D\min}$) и экваториальной анизотропии КЛ ($T_{A\max}$); максимальных (в течение события) скорости солнечного ветра ($T_{V\max}$) и индукции ММП ($T_{B\max}$); минимальных (в течение события) значений геомагнитного индекса ($T_{Dsf\min}$) и температурного индекса ($T_{KT\min}$) [Мелкумян и др., 2020]. За начало ФП принимался момент прихода ударной волны, в качестве индикатора которой использовалось внезапное начало геомагнитной бури (SSC) (http://isgi.unistra.fr/data_download.php). При отсутствии этого признака, началом ФП считаются резкие изменения основных параметров межпланетной среды (скорости солнечного ветра и/или ММП) или космических лучей.

Для решения поставленной задачи – сравнения поведения временных параметров ФП в событиях, связанных с разными типами солнечных источников, мы использовали идентификацию ФП, реализованную в базе FEID. отождествление ФП с источником требует комплексного анализа данных по вариациям КЛ, а также межпланетных и солнечных данных. Как правило, анализ начинался с изучения параметров солнечного ветра. Поведение этих параметров позволяло предварительно идентифицировать ФП с тем или иным типом источника. Затем проводился анализ солнечных данных и сравнение полученных результатов с существующими базами данных и каталогами (при наличии). На этой стадии анализа часто, но не всегда, подтверждались выводы, полученные в результате анализа параметров солнечного ветра.

Для корональных дыр поведение параметров солнечного ветра позволяет выделить: а) область взаимодействия высокоскоростного и фонового солнечного ветра; б) основную часть высокоскоростного потока. В области взаимодействия значения плотности межпланетного вещества и индукции ММП сильно меняются по величине (ММП еще и по направлению) и значительно возрастает температура. Когда Земля входит в основную часть высокоскоростного потока, этот вход обычно выделяется резким увеличением скорости солнечного ветра и таким же резким уменьшением плотности. Отличительные черты основной части HSS – повышенная скорость и температура, низкая плотность и пониженные значения ММП [Hundhausen, 1977; Wimmer-Schweingruber et al., 1997; Zhang et al., 2003; Cranmer, 2009]. Перечисленные критерии позволяли предварительно выделить некоторые ФП, как связанные с корональными дырами, и затем для этих событий проводился анализ солнечных данных (<https://sdo.gsfc.nasa.gov/>, <https://sohowww.nascom.nasa.gov>) и каталогов корональных дыр [Tlatov

et al., 2014; (http://www.solen.info/solar/coronal_holes.html)].

При привязке ФП к корональным выбросам массы, на первом этапе также проводился анализ параметров солнечного ветра. При приближении ICMEs к Земле, сначала наблюдается область взаимодействия, которая иногда начинается с прихода межпланетной ударной волны. В этой области увеличиваются плотность межпланетного вещества и индукция ММП и возрастают флуктуации ММП. Главная часть ICMEs обычно характеризуется высокой плотностью, низкой температурой и повышенными значениями ММП. Возмущения, вызванные CMEs, более изменчивы в своих характеристиках по сравнению с HSS из CHs [Zurbuchen and Richardson, 2006]. При идентификации ICMEs разные исследователи используют для анализа различные наборы параметров (напр., [Owens et al., 2005; Gopalswamy, 2006]). В базе данных FEID для предварительного выделения событий, связанных с CMEs, кроме обычных параметров солнечного ветра, используется также специально рассчитанный температурный индекс [Мелкумян и др., 2020; Melkumyan et al., 2021; (http://spaceweather.izmiran.ru/dbs/kt/temp_index.txt)]. Температурный индекс $KT = T_{\text{obs}}/T_{\text{exp}}$ — это отношение наблюдаемой протонной температуры T_{obs} к ожидаемой T_{exp} , которая вычисляется по скорости солнечного ветра V с использованием уравнения $\lg T_{\text{exp}} = a + b \lg V$. Коэффициенты a и b получены методом линейной регрессии с использованием степенных моделей зависимости протонной температуры от скорости для невозмущенного солнечного ветра. Температурный индекс аномально велик в областях взаимодействия разноскоростных потоков солнечного ветра и аномально мал внутри корональных выбросов массы и, особенно, магнитных облаков, что позволяет использовать его для выделения ФП, связанных с этими структурами.

После предварительного выделения событий по параметрам солнечного ветра проводился анализ солнечных данных: солнечные эрупции хорошо видны на снимках и видеоизображениях Солнца (<https://sdo.gsfc.nasa.gov/>, <https://sohowww.nascom.nasa.gov>), а связанные с ними CMEs проявляются в данных внеатомных коронографов, таких как LASCO коронограф на SOHO (<https://sohowww.nascom.nasa.gov>). На этом этапе использовались также базы данных и каталоги CMEs [Richardson and Cane, 2010; (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/); (<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>)] и другие интернет-ресурсы (напр., (<https://solarmonitor.org/>, https://solen.info/solar/old_reports/)). Выделенные таким образом ФП разделились на два класса по типу солнечного источника: CME1 — вспышечные выбросы из активной области и CME2 —

волоконные выбросы из регионов за пределами активных областей.

Для идентификации смешанных событий (группа MIX) использовались те же источники, что и перечисленные выше. В эту группу включены события смешанной природы, обусловленные сразу несколькими межпланетными возмущениями. Ситуация на орбите Земли может быть очень сложной из-за нескольких транзитных событий, происходящих близко во времени и пространстве [Burlaga et al., 2003; Cane, 2000; Lugas et al., 2017]. Возможны события, вызванные совместно и высокоскоростными потоками из корональных дыр и выбросами солнечного вещества, причем главным источником в одних могут быть высокоскоростные потоки из корональных дыр, а в других — выбросы солнечного вещества (напр., [Gopalswamy et al., 2009; Mohamed et al., 2012]). Такие события встречаются достаточно часто, когда по мере распространения от Солнца к Земле высокоскоростные потоки из CHs и ICMEs взаимодействуют между собой, что по-разному сказывается на изменении параметров солнечного ветра. Эти взаимодействия зачастую вызывают значительные магнитные бури, а также приводят к образованию более сложных условий для возникновения и развития ФП.

На рисунках 1–4 представлены примеры ФП из указанных групп событий. На рис. 1 представлен пример ФП для группы CME1. Событие началось с регистрации ударной волны 4 июня 2011 г. в 20:44 UT. Максимальное значение индукции ММП составило $B_{\text{max}} = 23.6$ нТл ($T_{B_{\text{max}}} = 6$ ч); скорости солнечного ветра $V_{\text{max}} = 556$ км/с ($T_{V_{\text{max}}} = 8$ ч); величины ФП $A_F = 3.2\%$ ($T_{\text{min}} = 8$ ч), экваториальной анизотропии КЛ $A_{\text{xymax}} = 1.78\%$ ($T_{A_{\text{xymax}}} = 27$ ч). Резкий рост величины индукции ММП и скорости солнечного ветра на ударной волне вызвал значительные изменения геомагнитных индексов, была зарегистрирована умеренная магнитная буря, максимальные значения индексов составили $Kp = 6.3$, $Dst = -45$ нТл ($T_{Dst_{\text{min}}} = 10$ ч). Температурный индекс имел низкие и аномально низкие значения ($KT_{\text{min}} = 0.243$, $T_{KT_{\text{min}}} = 6$ ч) на протяжении почти всего события. Самые большие изменения и значительный рост температурного индекса наблюдаются сразу после прихода ударной волны, что достаточно типично для области взаимодействия. Источником этого ФП считается вспышка класса C3.7 (E19S25), зарегистрированная 2 июня 2011 г. в 0722 UT, и связанный с ней ICME от 2 июня 2011 г. в 0812. Заметим, что низкие значения температурного индекса до регистрации ударной волны относятся к предыдущему событию.

Пример ФП, связанного с воздействием на Землю высокоскоростного потока из корональной дыры (группа CH), приведен на рис. 2. Нача-

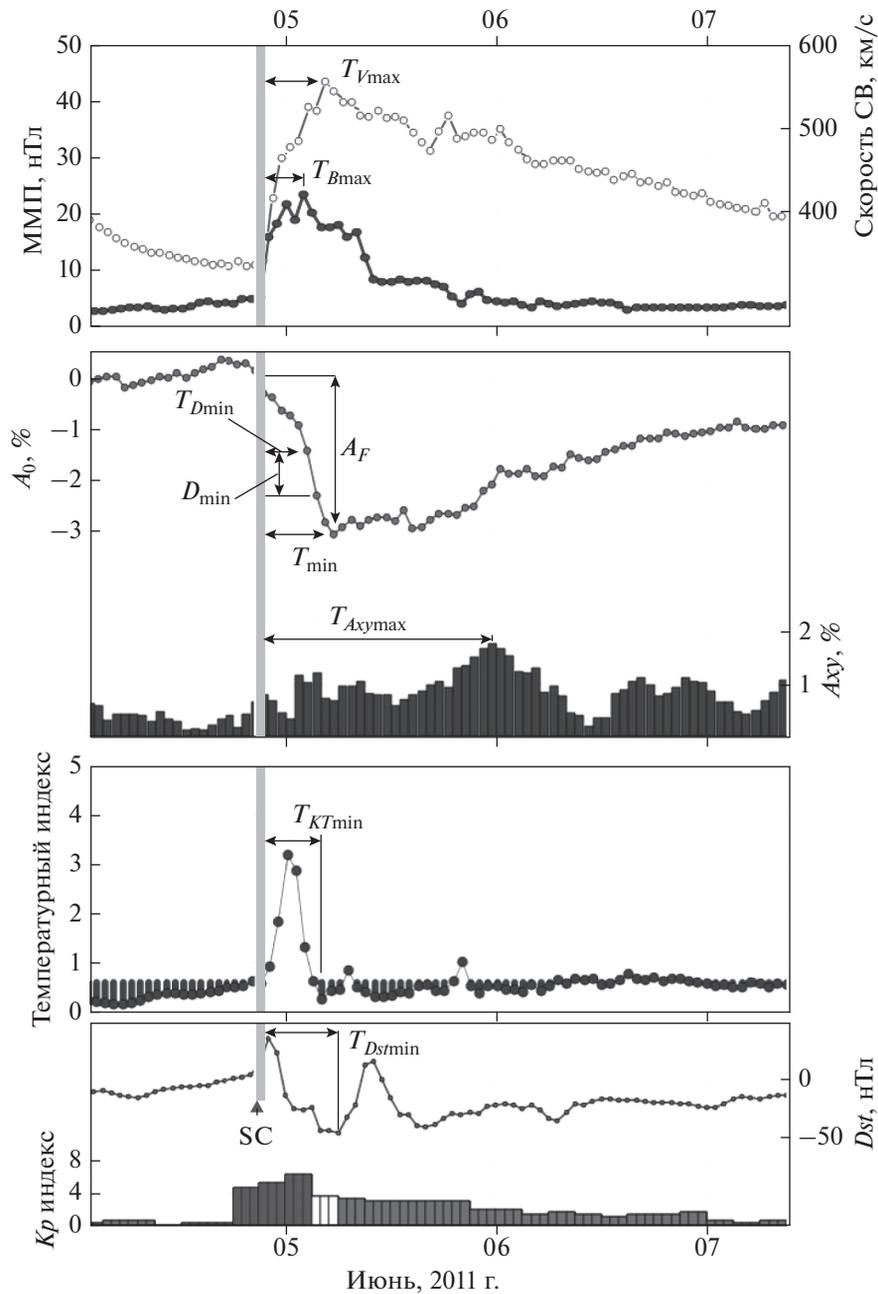


Рис. 1. Пример Форбуш-понижения 4 июня 2011 г. (группа СМЕ1 – ФП, вызванные межпланетными возмущениями от вспышечных выбросов из активных областей). *Примечание:* первая сверху панель показывает индукцию ММП и скорость солнечного ветра; вторая панель – вариации плотности КЛ (A_0 , левая шкала) и экваториальной составляющей анизотропии КЛ (A_{xy} , правая шкала); третья панель – температурный индекс; четвертая панель – геомагнитные K_p - и Dst -индексы; вертикальные линии – начало ФП (светло-серая со значком SC – регистрация SSC, черная со значком ops – начало события в отсутствие SSC); стрелками обозначены: амплитуда ФП (A_F); величина максимального часового уменьшения плотности КЛ (D_{min}); параметры временного развития ФП (T_{Vmax} , T_{Bmax} , T_{min} , T_{Dmin} , $T_{Axy_{max}}$, T_{KTmin} , T_{Dstmin}).

ло события связано с регистрацией ударной волны в 15:37 UT 30 июля 2015 г. В течение этого события максимальные значения параметров ММП, солнечного ветра и КЛ составили: $B_{max} = 14.7$ нТл ($T_{Bmax} = 8$ ч); $V_{max} = 613$ км/с ($T_{Vmax} = 67$ ч); $A_F = 1.3\%$ ($T_{min} = 68$ ч), $A_{xy_{max}} = 0.87\%$ ($T_{Axy_{max}} = 56$ ч). Для геомагнитных K_p - и Dst -индексов зареги-

стрированы максимальные значения $K_p = 4.3$, $Dst = -29$ нТл ($T_{Dstmin} = 33$ ч). Данное ФП связано с высокоскоростным потоком из трансэкваториальной корональной дыры (СН679, (http://www.soleno.info/solar/coronal_holes.html)), проходившей через центральный меридиан солнечного диска 28–29 июля 2015 г. Вход в высокоскоростной по-

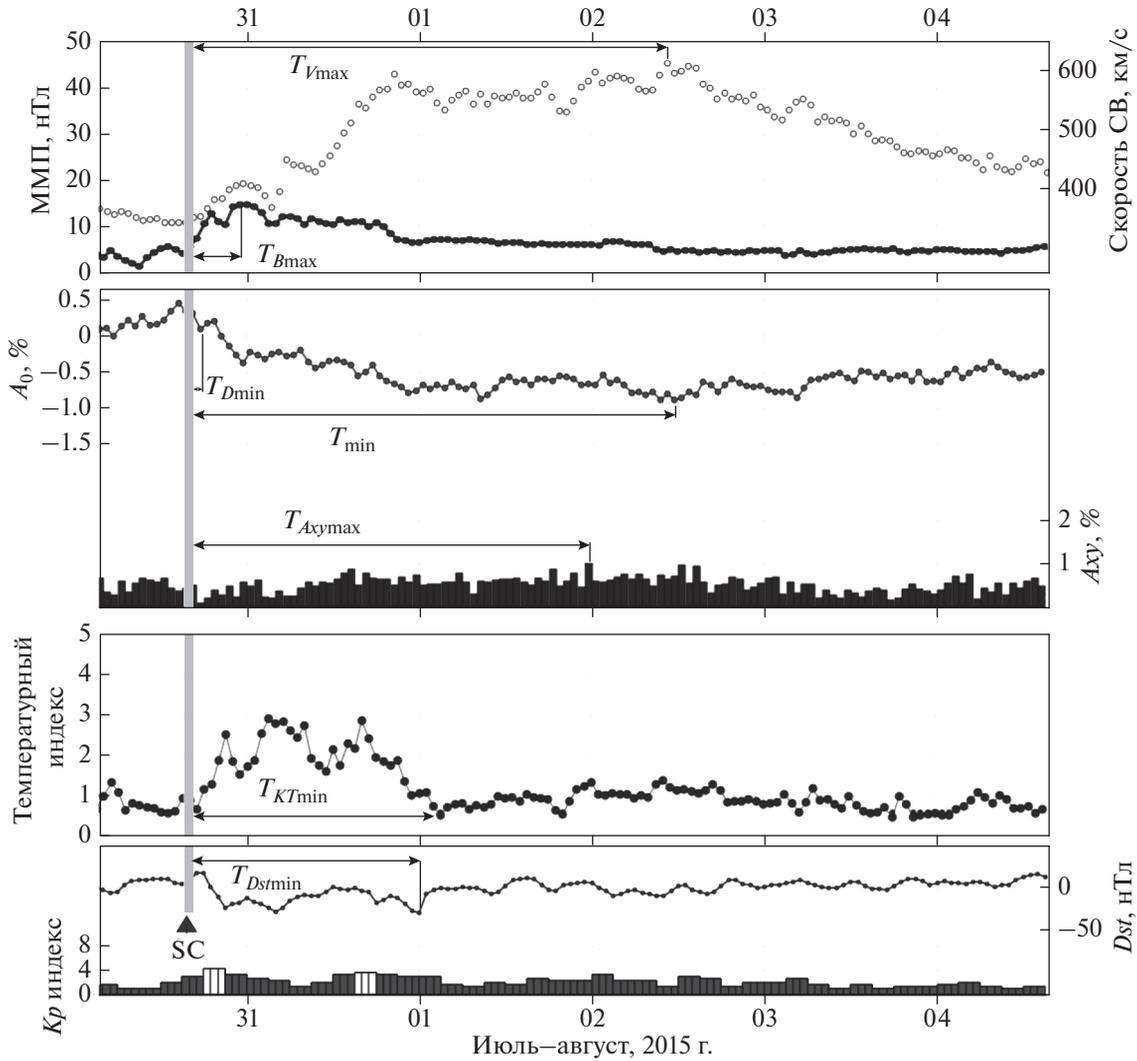


Рис. 2. Пример Форбуш-понижения 30 июля 2015 г. (то же, что на рис. 1, но для группы СН – ФП, вызванные высокоскоростными потоками из корональных дыр).

ток характеризуется довольно резким увеличением значений индукции ММП, плотности и протонной температуры и, соответственно, температурного индекса при плавном росте скорости солнечного ветра. В основной части потока высокие значения имеет скорость солнечного ветра (в течение 3–4 дней), а величина ММП уменьшается до нормальных значений в течение первых суток, при этом длительное время нахождения Земли в высокоскоростном потоке не дает большого вклада в изменение характеристик КЛ и незначительно влияет на геомагнитную активность. Значение $T_{Vmax} = 67$ ч определяет время регистрации максимальной скорости солнечного ветра на длительном интервале повышенных скоростей и в этом случае самое важное, что все высокие скорости наблюдаются значительно позже, чем высокие значения напряженности ММП. Относи-

тельно низкие значения температурного индекса наблюдаются не только в момент T_{KTmin} , но и существенно позже; при этом все они значимо больше, чем типичные значения для ICMEs. Похожая ситуация наблюдается в среднем поведении параметров для различных типов событий, которое будет обсуждаться далее.

Пример ФП для группы СМЕ2 от 20 июня 2010 г. в 21 UT изображен на рис. 3. Максимальное значение индукции ММП составило $B_{max} = 7.5$ нТл ($T_{Bmax} = 14$ ч); скорости солнечного ветра $V_{max} = 404$ км/с ($T_{Vmax} = 6$ ч); величины ФП $A_F = 1.2\%$ ($T_{min} = 26$ ч), экваториальной анизотропии КЛ $A_{xy,max} = 1.39\%$ ($T_{Axymax} = 8$ ч); геомагнитные индексы менялись незначительно, максимальные значения составили $Kp = 2.3$, $Dst = -7$ нТл ($T_{Dstmin} = 18$ ч); температурный индекс в течение долгого времени имел аномально низкие значения $KTmin =$

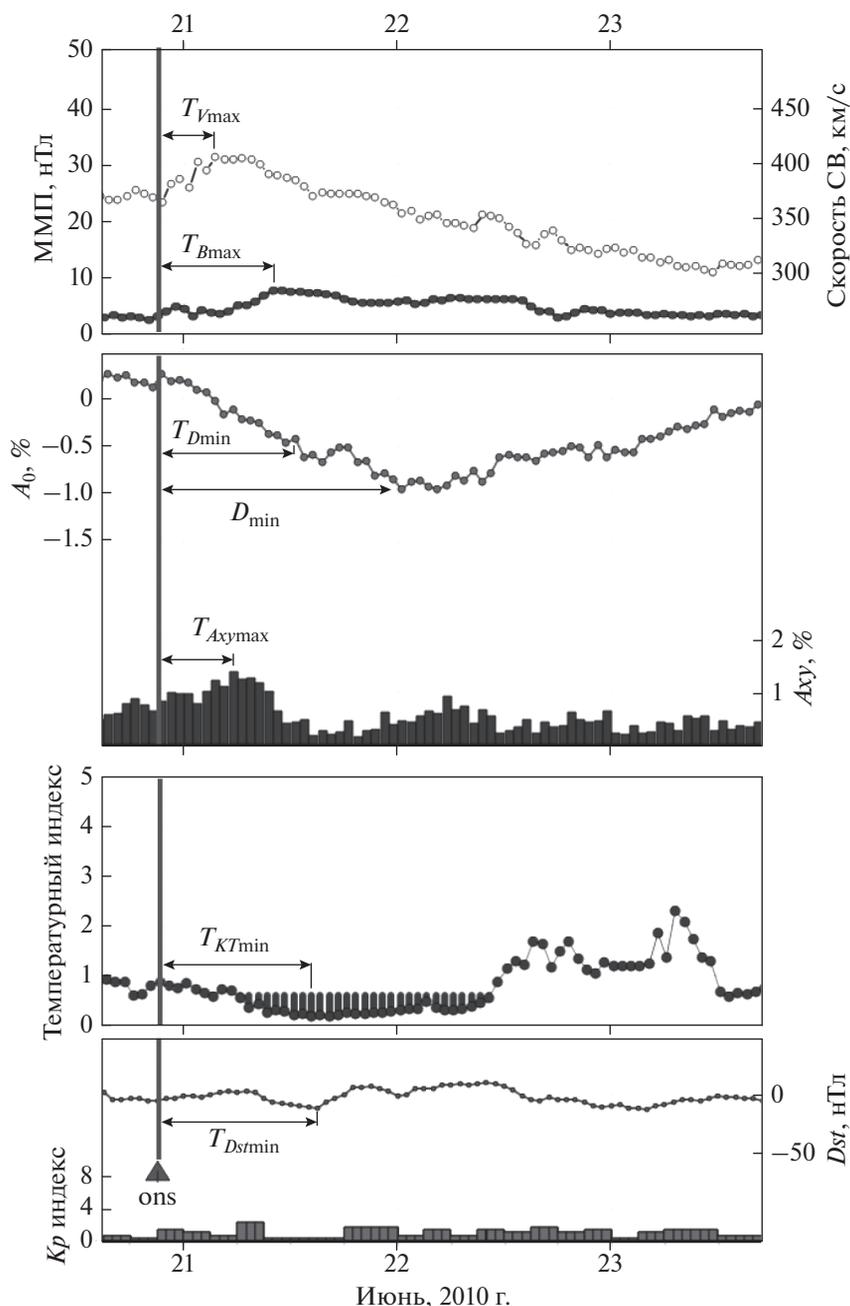


Рис. 3. Пример Форбуш-понижения 20 июня 2010 г. (то же, что на рис. 1, но для группы СМЕ2 – ФП, вызванные межпланетными возмущениями от волоконных выбросов вне активных областей).

$= 0.17$ ($T_{KTmin} = 15$ ч). Источником этого события был волоконный выброс 16 июня 2016 г., ICME от которого зарегистрировано на коронографе в 20:56 UT.

В качестве примера для группы МІХ было выбрано событие 3 августа 2013 г. (рис. 4). Основным источником этого ФП был высокоскоростной поток из северной корональной дыры (СН577, (http://www.solen.info/solar/coronal_holes.html)), которая проходила через центральный меридиан

солнечного диска 31 июля–1 августа 2013 г. Кроме этого, 30–31 июля на северо-западе центральной зоны была зарегистрирована эрупция волокна. В результате взаимодействия этих солнечных источников у Земли наблюдались следующие значения основных параметров солнечного ветра: максимальное значение индукции ММП составило $B_{max} = 15.6$ нТл ($T_{Bmax} = 22$ ч), максимальное значение скорости солнечного ветра $V_{max} = 566$ км/с ($T_{Vmax} = 38$ ч), и была зарегистрирована малая гео-

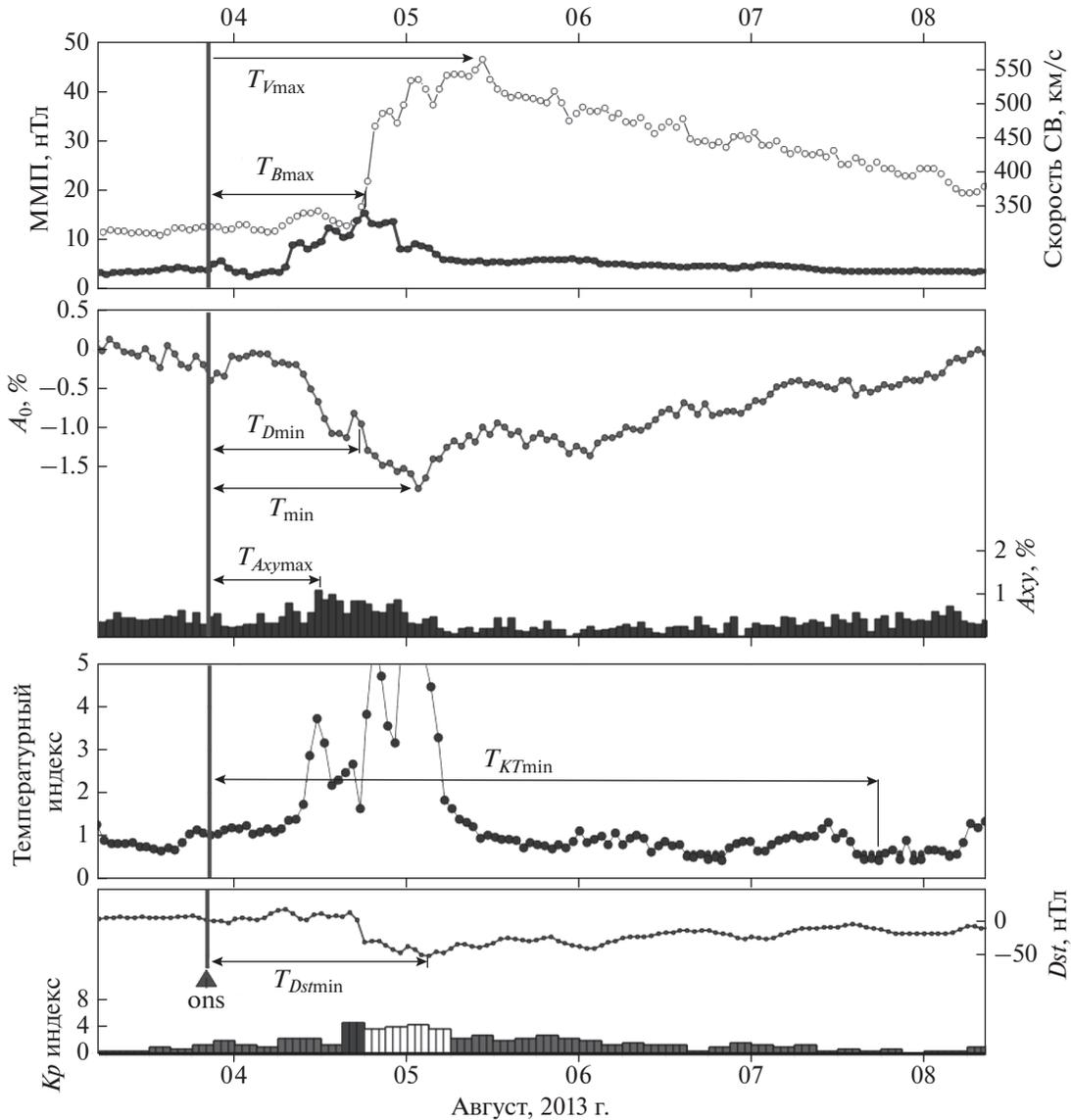


Рис. 4. Пример Форбуш-понижения 3 августа 2013 г. (то же, что на рис. 1, но для группы МІХ – ФП смешанной природы, обусловленные несколькими межпланетными возмущениями).

магнитная буря ($Kp = 4.7$, $Dst = -50$ нТл ($T_{Dstmin} = 31$ ч)). Величина ФП составила $A_F = 1.7\%$ ($T_{min} = 28$ ч), что значительно больше среднего значения для величины ФП от корональных дыр (см. табл. 1). К тому же, в поведении температурного индекса явно выделяются периоды пониженных значений в конце 6 и в конце 7 августа на фоне плавно спадающей скорости СВ, что также нетипично для событий от корональных дыр (рис. 4, третья панель).

Для полученных групп событий проводился статистический анализ семи параметров из базы данных FEID (T_{min} , T_{Dmin} , $T_{Axy_{max}}$, $T_{V_{max}}$, $T_{B_{max}}$, T_{KTmin} , T_{Dstmin}) и двух дополнительных параметров, характеризующих временные свойства собственно

ФП (T_{FD}) и связанных с ними межпланетных возмущений (T_{SW}):

$$T_{FD} = \sqrt{T_{min}^2 + T_{Dmin}^2},$$

$$T_{SW} = \sqrt{T_{V_{max}}^2 + T_{B_{max}}^2}.$$

Строились диаграммы размаха и гистограммы; вычислялись квантили распределений и средние значения параметров, а также парные коэффициенты корреляции для полной выборки и для каждой из четырех групп событий. Для оценки нормальности (логнормальности) распределений параметров использовался критерий согласия Колмогорова–Смирнова: вычислялись выборочные значения статистики Колмогорова–Смир-

Таблица 1. Медиана, среднее, квантили распределений временных параметров (в часах) и величины ФП (в %) для пяти групп событий (N – количество ФП)

Параметр	Группа	N	Медиана	Среднее	25%	75%	95%
T_{\min}	FULL	1055	18	22.7 ± 0.5	10	31	59
	CME1	250	16	16.3 ± 0.7	8	21	35
	CME2	151	19	17.7 ± 1.0	9	23	42
	CH	211	29	30.9 ± 1.3	15	46	67
	MIX	443	20	24.1 ± 0.8	10	33	58
$T_{D\min}$	FULL	1055	9	14.0 ± 0.5	3	19	51
	CME1	250	4	6.9 ± 0.5	1	10	23
	CME2	152	8	10.6 ± 0.9	3	15	30
	CH	211	13	19.7 ± 1.3	6	29	62
	MIX	443	10	16.4 ± 0.8	4	23	57
$T_{A\max}$	FULL	1055	15	17.6 ± 0.4	6	28	44
	CME1	250	10	13.4 ± 0.8	4	19	39
	CME2	152	13	15.2 ± 1.0	5	22	43
	CH	211	20	21.2 ± 1.0	8	34	46
	MIX	443	16	19.1 ± 0.7	6	31	45
$T_{V\max}$	FULL	1055	17	21.3 ± 0.5	7	31	56
	CME1	250	5	9.3 ± 0.6	3	12	26
	CME2	151	8	11.1 ± 0.9	3	15	32
	CH	211	31	31.3 ± 1.2	17	44	67
	MIX	443	23	26.6 ± 0.8	15	36	64
$T_{B\max}$	FULL	1055	8	11.1 ± 0.3	3	16	33
	CME1	250	5	8.6 ± 0.6	3	11	28
	CME2	151	11	13.9 ± 0.9	5	21	34
	CH	211	8	11.6 ± 0.7	4	16	35
	MIX	443	8	11.3 ± 0.5	4	14	35
$T_{KT\min}$	FULL	1055	20	20.6 ± 0.5	5	35	46
	CME1	250	18	19.5 ± 0.9	9	29	45
	CME2	151	18	18.9 ± 1.0	10	28	44
	CH	211	20	19.9 ± 1.2	2	37	46
	MIX	443	23	22.2 ± 0.8	4	39	47
$T_{Dst\min}$	FULL	1055	16	19.4 ± 0.5	8	28	48
	CME1	250	12.5	14.9 ± 0.8	6	19	42
	CME2	151	18	20.3 ± 1.2	5	28	49
	CH	211	19	23.4 ± 1.1	11	33	49
	MIX	443	16	19.7 ± 0.7	8	30	49
A_F	FULL	1055	1.1	1.7 ± 0.1	0.7	1.7	5.3
	CME1	250	3.0	3.2 ± 0.2	1.1	4.4	9.4
	CME2	151	1.8	1.8 ± 0.1	0.8	2.2	4.1
	CH	211	1.0	0.9 ± 0.03	0.6	1.2	1.5
	MIX	443	1.1	1.1 ± 0.03	0.7	1.4	2.4

нова и уровень значимости p ; гипотеза о нормальности (логнормальности) распределения принималась при $p > 0.05$ [Corder and Foreman, 2009]. Для разных групп событий были построены профили среднего ФП, отражающие особенности временного развития.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ и сравнение параметров временного развития ФП проводился для всех событий, выделенных и идентифицированных с солнечным источником с января 1997 г. по декабрь 2017 г. (группа FULL – полная выборка, 1055 событий), а также для отдельных групп событий, связанных с разными типами солнечных источников (группа СМЕ1 – 250 событий; СМЕ2 – 151 событие; СН – 211 событий; MIX – 443 события). В табл. 1 представлены средние значения и квантили распределений временных параметров и амплитуды ФП для полной выборки и четырех групп событий. Диаграммы размаха временных параметров представлены на рис. 5 (полная выборка FULL) и рис. 6 (группы СМЕ1, СМЕ2, СН, MIX). Из табл. 1 и рис. 5 видно, что в полной выборке время спада с вероятностью 95% ограничено значением 59 ч и превышает 95-процентный квантиль распределений остальных параметров. Максимум часового уменьшения плотности КЛ (медиана 9 ч, межквартильный интервал 3–19 ч) чаще всего находится в начале фазы спада (медиана 18 ч, межквартильный интервал 10–31 ч.). Это свойство характерно для всех групп событий, хотя и в разной степени (рис. 6). Оно особенно ярко выражено для группы СМЕ1 (T_{Dmin} 4 ч, 1–10 ч; T_{min} 16 ч, 8–21 ч) и наиболее слабо проявляется в группе СН (T_{Dmin} 13 ч, 6–29 ч; T_{min} 29 ч, 15–46 ч). Максимальные значения индукции ММП чаще всего также наблюдаются в начале фазы спада, но имеется довольно много событий, когда поле достигает самого большого значения уже в фазе восстановления (рис. 5, 6). Для скорости солнечного ветра ожидаемо наблюдаются наиболее выраженные различия распределений параметра T_{Vmax} между группами событий, связанных с корональными выбросами массы (СМЕ1: 5 ч, 3–12 ч; СМЕ2: 8 ч, 3–15 ч) с одной стороны и с высокоскоростными потоками из корональных дыр – с другой. В группе СН (T_{Vmax} 31 ч, 17–44 ч; T_{min} 29 ч, 15–46 ч) значительная часть событий характеризуется максимальной скоростью солнечного ветра на фазе восстановления ФП. В этой группе 95-процентный квантиль распределения параметров T_{min} (67 ч) и T_{Vmax} (67 ч) значимо выше, чем в полной выборке (59 ч) и в 2–2.5 раза больше, чем в группах СМЕ1 и СМЕ2. Из табл. 1 и рис. 5 также видно, что для полной выборки средние величины и квантили распределения T_{min} практически совпадают с аналогичными характеристика-

ми T_{Vmax} , т.е. фаза спада тем короче, чем быстрее скорость солнечного ветра достигает больших значений. Распределение T_{Dmin} очень близко к распределению T_{Vmax} , что подтверждает зависимость максимальной скорости уменьшения плотности КЛ от величины магнитного поля – когда поле слабое, больших скачков вариации плотности не наблюдается.

Построенные по данным таблицы схематические изображения ФП (рис. 7) показывают временное развитие среднего события по медианным значениям в группах СМЕ1, СМЕ2 и СН. Из рисунка видно, что для ФП, связанных с различными типами солнечных источников, наблюдается как сходство, так и заметные различия во временном развитии. Средние значения величины интервала времени от начала ФП до момента регистрации максимальных скорости уменьшения плотности и экваториальной анизотропии КЛ, скорости солнечного ветра и индукции ММП во всех трех группах наблюдаются в основной фазе развития ФП. Исключение составляет скорость солнечного ветра в группе СН, достигающая, в среднем, максимального значения на фазе восстановления КЛ. Понижение интенсивности КЛ в группе СМЕ1 происходит быстрее, и минимум (более глубокий) достигается несколько раньше, чем в группе СМЕ2, и значительно раньше, чем в группе СН. Группы СМЕ1 и СМЕ2 различаются по времени максимального часового уменьшения плотности ($Dmin$) значительно, чем по длительности фазы спада. Время достижения максимальных значений интенсивности ММП ($Vmax$) и скорости солнечного ветра ($Vmax$) практически совпадает в группе СМЕ1, а в группе СМЕ2 максимум индукции ММП существенно отстает от максимума скорости. Обнаруженные различия в группах СМЕ1 и СМЕ2 можно объяснить, прежде всего, величиной начальной скорости выбросов. Вспышечные выбросы, как правило, быстрее и имеют большие значения ММП, а волоконные – менее быстрые и обладают, как правило, более слабым магнитным полем (напр., [Иванов, 1996; Chertok et al., 2013]). Положение максимального значения экваториальной анизотропии ($Axmax$) для группы СН нужно интерпретировать с осторожностью вследствие большого разброса значений (межквартильный интервал 8–34 ч) и неустойчивого положения максимума. Большой разброс, по-видимому, связан с небольшим усилением анизотропии и менее выраженным максимумом для этой группы. Для большого количества событий в группе СН максимум анизотропии наблюдается на фазе восстановления.

Для всех временных параметров во всех группах событий рассчитывались статистика Колмогорова–Смирнова и уровень значимости p для

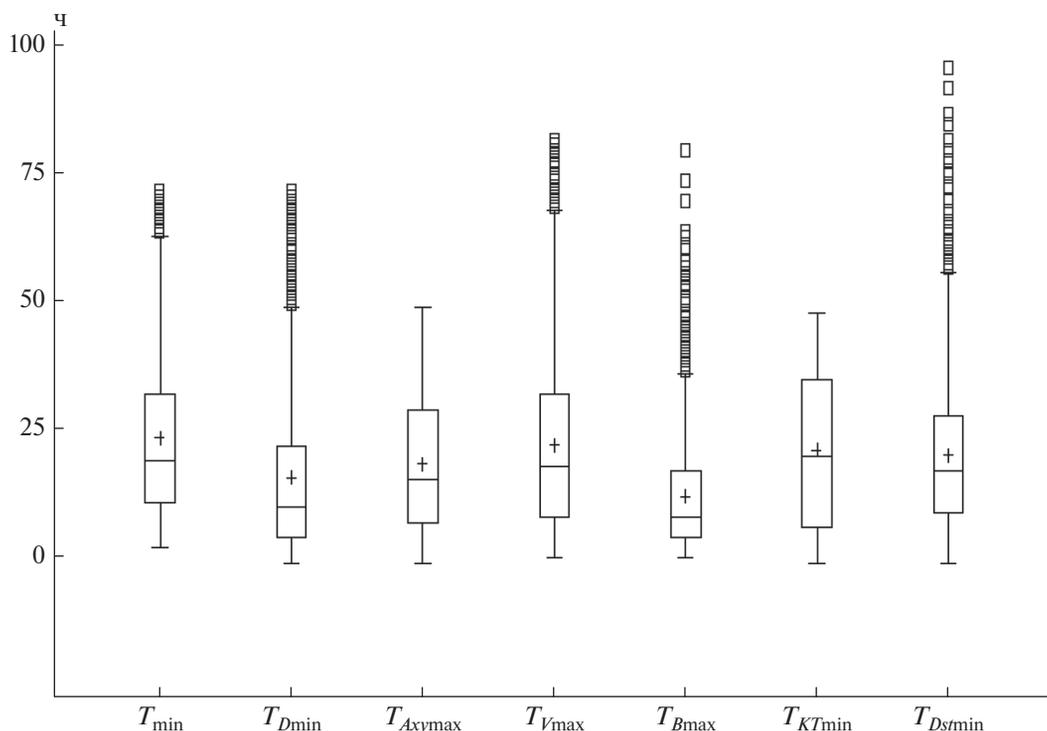


Рис. 5. Диаграммы размаха временных параметров для группы FULL.

оценки согласия распределений с нормальным (логнормальным) законом. Полученные результаты показали, что распределения всех временных параметров не соответствуют нормальному закону, но распределения параметров T_{SW} и T_{FD} подчиняются логнормальному закону во всех группах событий, кроме группы СН. Логнормальное распределение – простейший тип распределения, описывающий мультипликативные случайные процессы, в которых изменение параметра под каким-либо внешним воздействием зависит от предыдущего значения этого параметра (нормальное распределение описывает аддитивные случайные процессы, в которых такая зависимость отсутствует). Логнормальному закону распределения подчиняется параметр T_{SW} в группах СМЕ1 ($p = 0.055$), СМЕ2 ($p = 0.160$), СН ($p = 0.127$), и МІХ ($p = 0.140$). Распределение параметра T_{FD} соответствует логнормальному закону в группах СМЕ1 ($p = 0.118$), СМЕ2 ($p = 0.188$) и близко к этому закону в группе МІХ ($p = 0.047$). Гистограммы этих параметров и кривые нормального и логнормального распределений для разных групп событий представлены на рис. 8. Для ФП, связанных с корональными выбросами массы из активных областей, и для рекуррентных событий время развития ФП существенно запаздывает относительно времени достижения максимальных значений параметров солнечного ветра (медианные значения в группе СМЕ1: 17 ч для T_{FD}

и 11 ч для T_{SW} ; в группе СН: 39 ч для T_{FD} и 32 ч для T_{SW}). Для ФП, вызванных волоконными выбросами из неактивных областей, и для смешанных событий разница между значениями параметров, характеризующих временное развитие ФП и межпланетных неоднородностей, статистически незначима (медианные значения в группе СМЕ2: 18.5 ч для T_{FD} и 21 ч для T_{SW} ; в группе МІХ: 27.5 ч для T_{FD} и 28 ч для T_{SW}). Для ФП из групп СМЕ1 и СМЕ2 разница между значениями параметров, характеризующих временное развитие ФП, статистически незначима (медианные значения в группе СМЕ1 – 17 ч для T_{FD} , в группе СМЕ2 – 18.5 ч для T_{FD}). ФП из группы МІХ имеют значения T_{FD} (27.5 ч) между значениями этого параметра в группах СМЕ1 и СН (т.к. они происходят под действием и корональных выбросов, и высокоскоростных потоков из корональных дыр), а по параметру T_{SW} (28 ч) они ближе к ФП из группы СН, так как высокоскоростные потоки из корональных дыр оказывают более длительное влияние.

Между всеми исследуемыми параметрами были рассчитаны парные коэффициенты корреляции для полной выборки и для групп событий, связанных с разными типами солнечных источников. В группе FULL результаты показали умеренную корреляцию для параметров $T_{\min} - T_{V\max}$ ($r = 0.45$), $T_{\min} - T_{Ds\min}$ (0.34), $T_{\min} - T_{D\min}$ (0.31), $T_{Ds\min} - T_{V\max}$ (0.31) и слабую или статистически

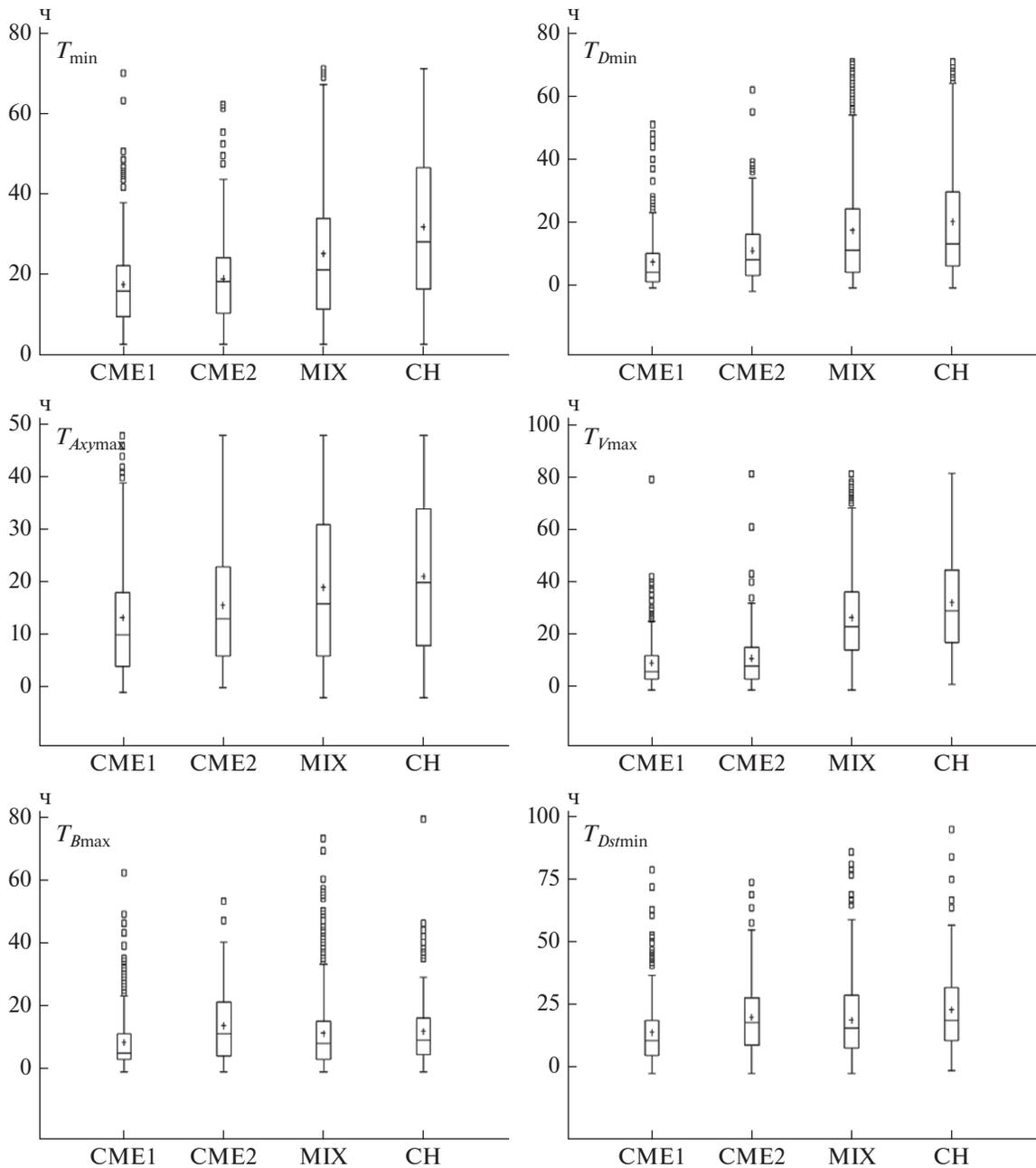


Рис. 6. Диаграммы размаха параметров T_{\min} , $T_{D\min}$, T_{Axymax} , T_{Vmax} , T_{Bmax} , T_{Dstmin} в группах CME1, CME2, MIX, CH.

незначимую корреляцию для остальных пар параметров (оценка тесноты статистической связи дается по шкале Чеддока [Chaddock, 1925]). При разбиении событий на группы, связанные с разными типами источников, корреляция между временными параметрами немного возрастает. Парные коэффициенты корреляции, рассчитанные для групп событий, показывают умеренную корреляцию между параметрами: $T_{\min} - T_{D\min}$ (0.38) для ФП, связанных с корональными выбросами массы; $T_{\min} - T_{Bmax}$ (0.38) в группе CME2;

$T_{\min} - T_{Vmax}$ (0.39), $T_{\min} - A_F$ (0.46), $A_F - T_{Vmax}$ (0.33), $T_{Vmax} - T_{Bmax}$ (0.38) в группе CH. Отмечается также умеренная корреляция между временем минимального значения Dst -индекса и параметрами: T_{\min} (0.49) в группе CME1, T_{Bmax} (0.41) в группе CME2, T_{Vmax} (0.36) в группе CH. Корреляция между остальными временными параметрами, а также между временными параметрами и амплитудными характеристиками вариаций КЛ и параметров солнечного ветра, слабая или статистически незначимая. Таким образом, сила корреляцион-

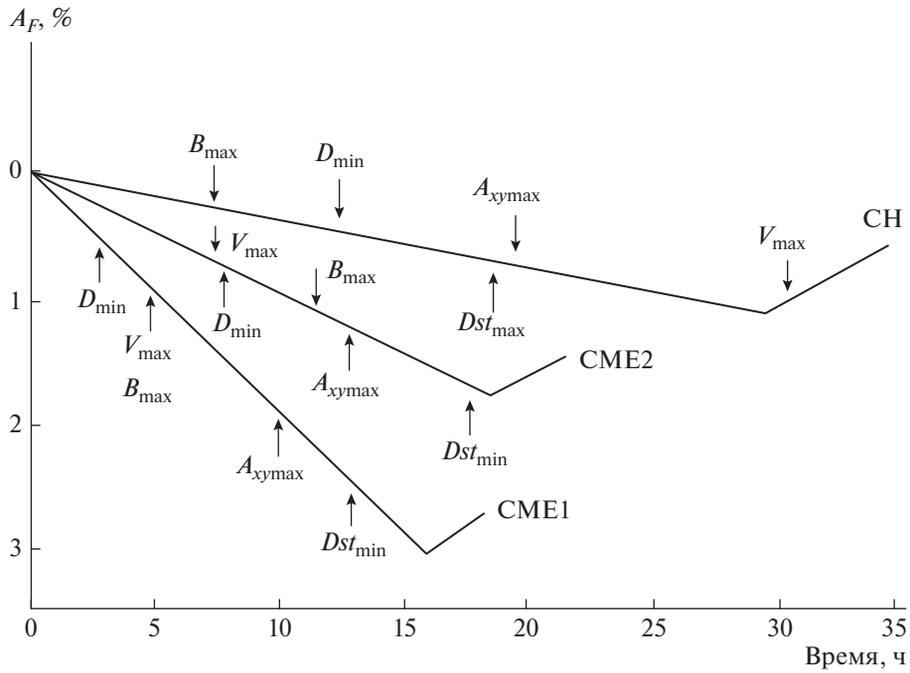


Рис. 7. Схематическое изображение средних ФП (по медианным значениям) в группах CME1, CME2, CH.

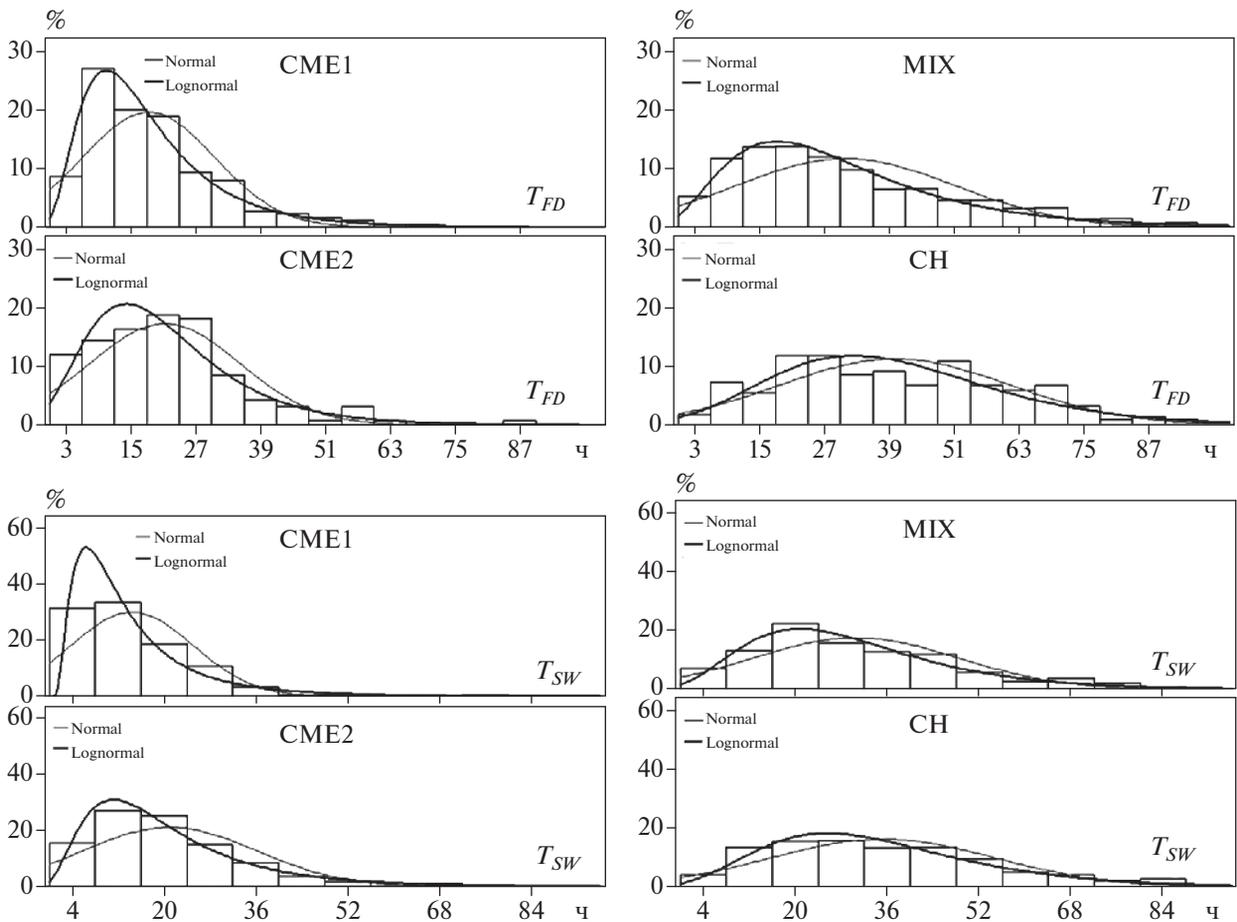


Рис. 8. Гистограммы параметров T_{FD} и T_{SW} для разных групп событий.

ной связи между продолжительностью фазы спада и временем максимального почасового уменьшения плотности КЛ значимо больше для событий, связанных с корональными выбросами массы, чем для вызванных высокоскоростными потоками из корональных дыр. Зависимость между длительностью фазы спада и амплитудой ФП, наоборот, выражена сильнее для рекуррентных событий, чем для спорадических. Что касается статистической связи между параметрами ФП и временными характеристиками межпланетных возмущений, то для рекуррентных ФП длительность фазы спада и амплитуда ФП зависят от времени максимальной скорости солнечного ветра, а для спорадических событий, связанных с волоконными выбросами вне активных областей, длительность фазы спада зависит от времени достижения максимального ММП. Корреляционная связь между временными характеристиками межпланетных возмущений (T_{Bmax} и T_{Vmax}) значимо проявляется только в группе событий, связанных с корональными дырами.

Это не должно удивлять, если вспомнить одно из наиболее существенных различий между межпланетными возмущениями от солнечных источников различных типов. В ICME усиленное магнитное поле существует внутри с момента рождения, а в высокоскоростном потоке из корональной дыры такого поля нет, и усиление поля создается в межпланетном пространстве при взаимодействии разноскоростного солнечного ветра. При этом скорость солнечного ветра в HSS исключительно важна, чем она выше, тем больше возрастает индукция ММП в области взаимодействия, где непременно располагается максимум поля. Поэтому в возмущениях этого типа T_{Bmax} и T_{Vmax} связаны: $T_{Bmax} < T_{Vmax}$. В ICME такая связь возникает значительно реже.

4. ВЫВОДЫ

На большом экспериментальном материале (1055 событий с 1997 по 2017 гг.) исследовалось развитие во времени Форбуш-понижений, связанных с разными типами солнечных источников: группа CME1 – ФП, связанные с корональными выбросами массы из активных областей и сопровождающиеся солнечными вспышками; группа CME2 – ФП, связанные с волоконными выбросами из регионов за пределами активных областей; группа SH – ФП, вызванные высокоскоростными потоками из корональных дыр; группа MIX – смешанные события, связанные с двумя или более источниками возмущений разных типов.

Исследовалось поведение семи временных параметров, содержащихся в базе данных FEID (длительность фазы спада; время от начала ФП до

момента регистрации максимальных значений: почасового уменьшения плотности КЛ, анизотропии КЛ, индукции ММП, скорости солнечного ветра, а также минимальных значений температурного индекса и *Dst*-индекса) и двух дополнительных параметров, показывающих изменение во времени характеристик КЛ (T_{FD}) и межпланетных возмущений (T_{SW}).

Анализ распределений временных параметров показал, что для ФП, связанных с разными типами солнечных источников, наблюдаются заметные различия в развитии событий. Понижение интенсивности КЛ в группе CME1 происходит быстрее, и минимум (более глубокий) достигается немного раньше, чем в группе CME2, и значительно раньше, чем в группе SH. Интервал времени от начала ФП до максимального почасового уменьшения плотности КЛ, в среднем, для группы CME1 в два раза меньше, чем для группы CME2, и в три раза меньше, чем для группы SH. Максимальное ММП и минимальный *Dst*-индекс для всех групп событий наблюдаются, в основном, в фазе спада КЛ. Максимальная скорость солнечного ветра наблюдается, чаще всего, в фазе спада для групп CME1 и CME2 и в фазе восстановления для группы SH. Максимальные значения ММП и скорости солнечного ветра совпадают по времени в группе CME1, а в группе CME2 максимум скорости опережает максимум поля. В группе SH среднее время достижения максимального значения ММП почти в четыре раза меньше, чем для скорости солнечного ветра. Регистрация максимальной анизотропии КЛ характеризуется большим разбросом во времени, и хотя средние значения приходятся на фазу спада, для большого количества событий, особенно в группе SH, максимальная анизотропия наблюдается уже на фазе восстановления. Для событий, связанных с корональными выбросами массы из активных областей, и для событий, связанных с высокоскоростными потоками из корональных дыр, наблюдается более длительное развитие ФП, в то время как для событий, связанных с волоконными выбросами вне активных областей, и для смешанных событий разница между средними значениями параметров T_{FD} и T_{SW} статистически незначима.

Корреляция между парами временных параметров, а также между временными параметрами и амплитудными характеристиками вариаций КЛ и межпланетных возмущений, чаще всего, слабая или статистически незначимая, для некоторых параметров – умеренная. Сила корреляционной связи между продолжительностью фазы спада и временем максимального почасового уменьшения плотности КЛ значимо больше для событий, связанных с корональными выбросами массы, чем для вызванных высокоскоростными потоками

ми из корональных дыр. Зависимость между длительностью фазы спада и амплитудой ФП, наоборот, выражена сильнее для рекуррентных событий, чем для спорадических. Что касается статистической связи между параметрами ФП и временными характеристиками межпланетных возмущений, то для рекуррентных ФП длительность фазы спада и амплитуда ФП зависят от времени регистрации максимальной скорости солнечного ветра, а для спорадических событий, связанных с волонными выбросами вне активных областей, длительность фазы спада зависит от времени достижения максимального значения ММП. Корреляционная связь между временными характеристиками межпланетных возмущений ($T_{V_{\max}}$ и $T_{V_{\max}}$) значительно проявляется только в группе событий, связанных с корональными дырами.

В целом, по совокупности всех результатов, более всего выделяется группа ФП, вызванных высокоскоростными потоками из корональных дыр. По-видимому, это связано с тем, что в этой группе межпланетные возмущения более длительные, а понижение интенсивности КЛ создается в области взаимодействия, т.е. в ведущей части возмущения, тогда как в остальных группах ФП генерируется, в основном, в ICME, т.е. в более глубоких частях возмущения солнечного ветра.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

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

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Абунина М.А., Абунин А.А., Белов А.В. и Шлык Н.С. поддержаны грантом Российского научного фонда РФНФ № 20-72-10023.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абунин 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 аэрономия. Т. 52. № 3. С. 313–320. 2012.
- Абунина М.А., Абунин А.А., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Асипенка А.С., Оленева В.А., Янке В.Г. Связь параметров Форбуш-эффектов с гелиодолготой солнечных источников // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 53. № 1. С. 13–21. 2013.
- Белов А.В., Ерошенко Е.А., Абунина М.А., Абунин А.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Поведение плотности потока космических лучей в начале Форбуш-эффектов // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 56. № 6. С. 683–689. 2016.
- Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке В.В., Оленева В.А., Абунина М.А., Абунин А.А. Метод глобальной съемки для мировой сети нейтронных мониторов // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 3. С. 374–389. 2018. <https://doi.org/10.7868/S0016794018030082>
- Иванов К.Г. Солнечные источники потоков межпланетной плазмы на орбите Земли // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 36. № 2. С. 19–27. 1996.
- Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Основные свойства Форбуш-эффектов, связанных с высокоскоростными потоками из корональных дыр // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 2. С. 163–176. 2018. <https://doi.org/10.7868/S0016794018020025>
- Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Поведение скорости и температуры солнечного ветра в межпланетных возмущениях, создающих Форбуш-понижения // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 4. С. 547–556. 2020. <https://doi.org/10.31857/S0016794020040100>
- Черток И.М., Абунин А.А., Белов А.В., Гречнев В.В. Зависимость характеристик Форбуш-понижений от параметров солнечных эрупций // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 77. № 5. С. 615–617. 2013.
- Belov A.V. Large-scale modulation: View from the Earth // Space Sci. Revs. V. 93. P. 71–96. 2000.
- Belov A.V., Eroshenko E.A., Oleneva V.A., Struminsky A.B., Yanke V.G. What determines the magnitude of Forbush decreases? // Adv. Space Res. V. 27. № 3. P. 625–630. 2001.
- Belov A.V. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena // Proc. IAU Symposium. № 257. P. 119–130. 2009.
- Burlaga L., Berdichevsky D., Gopalswamy N., Lepping R., Zurbuchen T. Merged interaction regions at 1 AU // J. Geophys. Res. V. 108. I. A12. CiteID 1425. 2003. <https://doi.org/10.1029/2003JA010088>
- Cane H.V., Richardson I.G., von Rosenvinge T.T., Wibberenz G. Cosmic ray decreases and shock structure: A multispacecraft study // J. Geophys. Res. V. 99. № A11. P. 21429–21441. 1994.
- Cane H.V. Coronal mass ejections and Forbush decreases // Space Sci. Rev. V. 93. № 1/2. P. 55–77. 2000.
- Chaddock R.E. Principles and methods of statistics (1st ed.). Boston: Houghton Mifflin Company. 471 p. 1925.
- Chertok I.M., Grechnev V.V., Belov A.V., Abunin A.A. Magnetic flux of EUV arcade and dimming regions as a relevant parameter for early diagnostics of solar eruptions – sources of non-recurrent geomagnetic storms and Forbush decreases // Solar Phys. V. 282. P. 175–199. 2013. <https://doi.org/10.1007/s11207-012-0127-1>
- Corder G.W., Foreman D.I. Nonparametric statistics for non-statisticians. New Jersey: John Wiley & Sons, 264 p. 2009.
- Cranmer S.R. Coronal holes // Living Rev. Solar Phys. V. 6. № 1. ID. 3. 2009.
- Forbush S.E. On the effects in the cosmic-ray intensity observed during magnetic storms // Phys. Rev. V. 51. P. 1108–1109. 1937.
- Dumbović M., Vršnak B., Čalogović J., Župan R. Cosmic ray modulation by different types of solar wind distur-

- bances // *Astron. Astrophys.* V. 538. A28. 2012.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201117710>
- *Gopalswamy N.* Properties of the Interplanetary Mass Ejections // *Space Sci. Rev.* V. 124. № 1–4. P. 145–168. 2006.
<https://doi.org/10.1007/s11214-006-9102-1>
- *Gopalswamy N., Mäkelä P., Xie H., Akiyama S., Yashiro S.* CME interactions with coronal holes and their interplanetary consequences // *J. Geophys. Res.* V. 114. № A3. CiteID A00A22. 2009.
<https://doi.org/10.1029/2008JA013686>
- *Hundhausen A.J.* An interplanetary view of coronal holes / Coronal holes and high speed wind streams. Ed. *Zirker J.B.* Colorado Associated University Press, Boulder. P. 225–329. 1977.
- *Iucci N., Parisi M., Storini M. et al.* Forbush decreases: origin and development in the interplanetary space // *Nuovo Cimento C.* V. 2C. P. 1–52. 1979a.
<https://doi.org/10.1007/BF02507712>
- *Iucci N., Parisi M., Storini M., Villorosi G.* High speed solar wind streams and galactic cosmic ray modulation // *Nuovo Cimento C.* V. 2C. P. 421–438. 1979b.
<https://doi.org/10.1007/BF02558283>
- *King J.H., Papitashvili N.E.* Solar wind spatial scales in and comparisons of hourly Wind and ACE plasma and magnetic field data // *J. Geophys. Res.* V. 110. № A2. 2005.
<https://doi.org/10.1029/2004JA010649>
- *Lockwood J.A.* Forbush decreases in the cosmic radiation // *Space Sci. Revs.* V. 12. № 5. P. 658–715. 1971.
<https://doi.org/10.1007/BF00173346>
- *Lockwood J.A., Webber W.R., Jokipii J.R.* Characteristic recovery times of Forbush-type decreases in the cosmic radiation. I – Observations at Earth at different energies // *J. Geophys. Res.* V. 91. P. 2851–2857. 1986.
- *Lugaz N., Temmer M., Wang Y. et al.* The interaction of successive coronal mass ejections: A review // *Solar Phys.* V. 292. № 4. Article ID 64. 2017.
<https://doi.org/10.1007/s11207-017-1091-6>
- *Melkumyan A.A., Belov A.V., Abunina M.A., Abunin A.A., Eroshenko E.A., Yanke V.G., Oleneva V.A.* Comparison between statistical properties of Forbush decreases caused by solar wind disturbances from coronal mass ejections and coronal holes // *Adv. Space Res.* 2019. V. 63. № 2. P. 1100–1109. 2019.
<https://doi.org/10.1134/S0016793220040106>
- *Melkumyan A.A., Belov A.V., Abunina M.A., Abunin A.A., Eroshenko E.A., Yanke V.G., Oleneva V.A.* Solar wind temperature-velocity relationship over the last five solar cycles and Forbush decreases associated with different types of interplanetary disturbance // *MNRAS.* V. 500. № 3. P. 2786–2797. 2021.
<https://doi.org/10.1093/mnras/staa3366>
- *Mohamed A. A., Gopalswamy N., Yashiro S., Akiyama S., Mäkelä P., Xie H., Jung H.* The relation between coronal holes and coronal mass ejections during the rise, maximum, and declining phases of Solar Cycle 23 // *J. Geophys. Res.* V. 117. № A1. CiteID A01103. 2012.
<https://doi.org/10.1029/2011JA016589>
- *Owens M.J., Cargill P.J., Pagel C., Siscoe G.L., Crooker N.U.* Characteristic magnetic field and speed properties of interplanetary coronal mass ejections and their sheath regions // *J. Geophys. Res.* V. 110. № A1. CiteID A01105. 2005.
- *Papailiou M., Abunina M., Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Mavromichalaki H.* Large solar decreases and their solar sources: Features and characteristics // *Solar Phys.* V. 295. № 12. Article id 144. 2020.
<https://doi.org/10.1007/s11207-020-01735-8>
- *Parker E.N.* Interplanetary dynamical processes. N.Y.: Interscience Publishers, 272 p. 1963.
- *Richardson I.G.* Energetic particles and corotating interaction regions in the solar wind // *Space Sci. Rev.* V. 111. № 3. P. 267–376. 2004.
<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.* V. 264. № 1. P. 189–237. 2010.
<https://doi.org/10.1007/s11207-010-9568-6>
- *Tlatov A., Vasil'eva V., Tavastsherna K.* Coronal holes in solar cycles 21 to 23 // *Solar Phys.* V. 289. № 4. P. 1349–1358. 2014.
<https://doi.org/10.1007/s11207-013-0387-4>
- *Wimmer-Schweingruber R.F., von Steiger R., Paerli R.* Solar wind stream interfaces in corotating interaction regions: SWICS/Ulysses results // *J. Geophys. Res.* V. 102. № A8. P. 17407–17417. 1997.
- *Zhang J., Woch J., Solanki S.K. et al.* Interplanetary and solar surface properties of coronal holes observed during solar maximum // *J. Geophys. Res.* V. 108. № A4. 2003.
<https://doi.org/10.1029/2002JA009538>
- *Zurbuchen T.H., Richardson I.G.* In-situ solar wind and magnetic field signatures of interplanetary Coronal Mass Ejections // *Space Sci. Rev.* V. 123. № 1–3. P. 31–43. 2006.