

УДК 524.1.352+539.12

СХОДСТВО И РАЗЛИЧИЕ ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЙ, СВЯЗАННЫХ С ПОТОКАМИ ИЗ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР, ВОЛОКОННЫМИ ВЫБРОСАМИ И ВЫБРОСАМИ ИЗ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

© 2022 г. А. А. Мелкумян¹, *, А. В. Белов¹, **, М. А. Абунина¹, ***,
Н. С. Шлык¹, А. А. Абунин¹, 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

***e-mail: abunina@izmiran.ru

Поступила в редакцию 15.12.2021 г.

После доработки 11.01.2022 г.

Принята к публикации 27.01.2022 г.

По материалам созданной и поддерживаемой в ИЗМИРАН базы данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений исследовались Форбуш-понижения за период с 1997 по 2020 гг. С использованием статистических методов сравнивались Форбуш-понижения, связанные с: корональными выбросами массы из активных областей, сопровождающимися солнечными вспышками; волоконными выбросами за пределами активных областей; высокоскоростными потоками из корональных дыр; несколькими источниками. Исследовалось также различие между Форбуш-понижениями, вызванными корональными выбросами массы, когда в межпланетных возмущениях у Земли наблюдались или не наблюдались магнитные облака. Было показано, что для спорадических Форбуш-понижений распределения большинства параметров асимметричны, для рекуррентных – почти симметричны; самые сильные корреляции между параметрами Форбуш-понижений и межпланетных возмущений наблюдаются в группе корональных выбросов из активных областей, сопровождающихся солнечными вспышками и имеющих структуру магнитного облака.

DOI: 10.31857/S0016794022030117

1. ВВЕДЕНИЕ

Форбуш-эффектом, или Форбуш-понижением (ФП), называют изменение плотности и анизотропии космических лучей (КЛ) в крупномасштабных возмущениях солнечного ветра [Forbush, 1937; Lockwood, 1971; Iucci et al., 1979a; Cane, 2000; Belov et al., 2001; Belov, 2009]. Во время ФП интенсивность галактических КЛ относительно быстро убывает, а за понижением, как правило, следует более медленное восстановление. В зависимости от типа возмущений межпланетной среды ФП делятся на две группы: спорадические – вызванные межпланетными возмущениями, связанными с корональными выбросами массы (*Coronal Mass Ejections* – CMEs) [Cane, 2000; Gopalswamy, 2010a; Richardson and Cane, 2011], и рекуррентные – вызванные высокоскоростными потоками плазмы из корональных дыр (*Coronal Holes* – CHs) [Iucci et al., 1979b; Richardson, 2004; Singh and Badruddin, 2007b]. Исследования ФП разного типа показывают их широкую

изменчивость по амплитуде, длительности, анизотропии КЛ, максимальному часовому понижению плотности КЛ и другим параметрам. Можно с уверенностью утверждать, что все ФП большой величины (>4%) и большая часть ФП средней величины (2–3%) связаны с CMEs; высокоскоростные потоки из корональных дыр могут быть главной причиной многих ФП, но эти эффекты не бывают большими (не превышают 3%) [Belov, 2009]. Влияние разного типа возмущений солнечного ветра на модуляцию галактических КЛ исследовалось во многих работах [например, Абунин и др., 2012; Dumbović et al., 2012, 2016; Chertok et al., 2013; Kumar and Badruddin, 2014a, b; Мелкумян и др., 2018; Melkumyan et al., 2019; Шлык и др., 2021]. В ряде работ это влияние исследуется по результатам наблюдений за достаточно длительным интервалом времени, что позволяет использовать статистические методы для выявления особенностей рекуррентных и спорадических ФП. Так, в работе [Мелкумян и др.,

2018] с использованием уравнений множественной регрессии было показано, что ФП, вызванные ICMEs, значительно сильнее зависят от скорости солнечного ветра и индукции межпланетного магнитного поля (ММП), чем ФП, вызванные высокоскоростными потоками из корональных дыр. В работе [Melkumyan et al., 2019] показано отличие распределений параметров ФП и вызывающих их межпланетных возмущений, а также силы корреляционной связи между параметрами, для рекуррентных и спорадических ФП.

В настоящем исследовании сравниваются ФП, связанные с воздействием на Землю высокоскоростных потоков из корональных дыр – группа событий СН, с двумя различными типами CMEs – группы событий CME1 (выбросы из активных областей на Солнце, сопровождающиеся вспышками) и CME2 (волоконные выбросы из регионов за пределами активных областей), а также смешанные события – группа MIX (ФП, вызванные двумя и более солнечными источниками). Различное влияние на гелиосферу корональных выбросов типа CME1 и CME2 описано, например, в работе [Gopalswamy et al., 2010b].

Так как ФП возникают при расширении частично закрытых магнитных структур в солнечном ветре [Lockwood, 1971; Cane, 1993; Belov, 2009], а магнитное облако (*Magnetic Cloud* – MC) [Burlaga et al., 1981, 2002] – очевидный пример такой структуры, то естественно, что ФП имеют тесную связь с MC. По данным Belov et al. [2015] большинство магнитных облаков модулируют КЛ, уменьшая их плотность, причем внутри MC наблюдается наиболее глубокое падение плотности. По данным Richardson and Cane [2010] именно в магнитных облаках чаще всего бывает большая B_z -компонента ММП, поэтому при прохождении MC возникают магнитные бури и геомагнитные индексы имеют наибольшие значения. Для магнитных облаков характерны также повышенная индукция ММП и аномально низкая протонная температура [Kim et al., 2013]. Воздействие MC на галактические КЛ рассматривалось во многих работах [например, Badruddin et al., 1986; Zhang and Burlaga, 1988; Lockwood et al., 1991; Singh and Badruddin, 2007a; Абунина и др., 2021]. Как было показано Zhang et al. [2013], все ICMEs содержат структуру, определяющую MC, но не во всех событиях такая структура может быть зарегистрирована: если Земля пересекает выброс в его периферийной части, магнитное облако, как правило, не наблюдается [Yashiro et al., 2013]. В настоящей работе для событий, связанных с двумя типами CMEs, исследована разница в статистических свойствах параметров ФП и вызывающих их межпланетных возмущений в случаях, когда магнитное облако приходит к Земле – группы событий CME1 + MC, CME2 + MC, и когда оно до Земли не доходит – группы CME1–MC, CME2–MC.

Таким образом, цель настоящей работы:

1) за длительный период (с января 1997 по декабрь 2020 гг.), используя базу данных FEID, сравнить статистические свойства параметров Форбуш-понижений для событий, связанных с разными типами солнечных источников: потоками из корональных дыр; корональными выбросами массы из активных областей, сопровождающимися солнечными вспышками; волоконными выбросами из регионов за пределами активных областей; несколькими источниками;

2) для Форбуш-понижений, связанных с выбросами из активных областей и волоконными выбросами, исследовать статистические свойства параметров в случаях наличия или отсутствия магнитного облака в теле выброса около Земли.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В 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-ap/wdc/>) и сетевой базы данных (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/index.html>). Информация по солнечным вспышкам основана на рентгеновских измерениях серии спутников GOES (<http://www.swpc.noaa.gov/ftpdir/lists/xray>, <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/events/>).

Для сравнения ФП, связанных с разными типами солнечных и межпланетных источников, использовались события из базы данных FEID с января 1997 г. по декабрь 2020 г., для которых сделана уверенная привязка к источнику (всего 1509 событий). Для привязки каждого события к солнечному источнику проводился комплексный анализ вариаций КЛ, межпланетных и солнечных данных. Процедура идентификации ФП с солнечными источниками подробно описана в работах [Мелкумян и др., 2018, 2022]. Списки магнитных облаков, используемые при сравнении спорадических ФП в случаях, когда MC приходит к

Земле, и когда оно до Земли не доходит, взяты из статей [Lynch et al., 2003, 2005; Huttunen et al., 2005; Marubashi and Lepping, 2007; Ермолаев и др., 2009; Gopalswamy et al., 2010c; Richardson and Cane, 2010; Kim et al., 2013] и онлайн каталогов (https://wind.nasa.gov/mfi/mag_cloud_pub1.html, https://wind.nasa.gov/mfi/mag_cloud_S1.html, https://cdaw.gsfc.nasa.gov/meetings/2010_fluxrope/LWS_CDAW2010_ICMETbl.html, <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>, <http://www.iki.rssi.ru/omni/catalog/>).

В качестве параметров ФП использовались: амплитуда (величина) ФП (AF); максимальное в течение события часовое уменьшение плотности КЛ (D_{min}); максимальное значение экваториальной анизотропии КЛ ($A_{x_{max}}$); размах азимутальной анизотропии КЛ (Az_{range}). В качестве параметров межпланетных возмущений, вызывающих ФП, использовались: максимальное в течение события значение индукции ММП (B_{max}); максимальное значение скорости солнечного ветра (V_{max}); минимальное значение температурного индекса (KT_{min}) [<http://spaceweather.izmiran.ru/dbs/kt/tempindex.txt>]. Температурный индекс $KT = T_{obs}/T_{exp}$ равен отношению наблюдаемой протонной температуры T_{obs} к ожидаемой температуре T_{exp} , вычисленной с помощью степенных моделей $\lg T_{exp} = a + b \lg V$, где V – почасовые значения скорости солнечного ветра. Коэффициенты a и b рассчитаны методом линейной регрессии по значениям температуры и скорости невозмущенного солнечного ветра [Мелкумян и др., 2020]. В качестве характеристик геомагнитной активности использовались: минимальное в течение события значение Dst -индекса (Dst_{min}) и максимальное значение Ap -индекса (Ap_{max}). За начало ФП принимался момент прихода ударной волны, в качестве индикатора которой использовалось внезапное начало геомагнитной бури (*Sudden Storm Commencement* – SSC) (http://isgi.unistra.fr/data_download.php). При отсутствии этого признака началом ФП считались резкие изменения основных параметров межпланетной среды (скорости солнечного ветра и/или индукции ММП) и/или космических лучей.

Статистический подход к анализу данных предполагает, что свойства большого количества изучаемых объектов представляют доминирующие признаки индивидуального события. Для сравнения статистических свойств параметров ФП и связанных с ними межпланетных возмущений в группах событий, вызванных разными типами солнечных и межпланетных источников, строились диаграммы размаха и графики дополнительной кумулятивной функции распределения (*Complementary Cumulative Distribution Function* – CCDF); вычислялись средние значения, квартили распределений и парные коэффициенты корреляции между параметрами.

Для сравнения коэффициентов корреляции вычислялись z -статистика и уровень значимости p ; разница между двумя коэффициентами считалась статистически значимой при $p < 0.05$. Оценка силы корреляционной связи давалась по шкале Чеддока [Chaddock, 1925]: $r < 0.3$ – слабая, $0.3 \leq r < 0.5$ – умеренная, $0.5 \leq r < 0.7$ – значительная, $r \geq 0.7$ – сильная. Для оценки нормальности (логнормальности) распределений параметров использовался критерий согласия Колмогорова–Смирнова: вычислялись выборочные значения статистики Колмогорова–Смирнова и уровень значимости p ; гипотеза о нормальности (логнормальности) распределения принималась при $p > 0.05$ [Corder and Foreman, 2009].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. ФП, связанные с корональными выбросами из активных областей (группа CME1), волоконными выбросами вне активных областей (группа CME2), потоками из корональных дыр (группа CH) и несколькими источниками (группа MIX)

Как было указано во Введении, мы рассматривали четыре группы событий: CH, CME1, CME2, MIX. На рисунках 1–4 приведено поведение основных параметров солнечного ветра, ММП, КЛ и геомагнитной активности для событий из каждой группы: 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_x , правая шкала); третья панель – температурный индекс (K_T); четвертая панель – геомагнитные K_p - и Dst -индексы; вертикальные линии – начало ФП: светло-серая со значком SC – регистрация SSC; черная со значком ons – начало события в отсутствие SSC.

На рисунке 1 приведен пример ФП из группы CME1 27 августа 2001 г. Началом этого ФП считается регистрация ударной волны в 19:52 UT. Источником этого события был корональный выброс массы типа гало от 25 августа в 16:50 UT (со скоростью 1433 км/с), связанный с большой вспышкой X5.3 (E17S34) в 16:23 UT 25 августа. Во время этого межпланетного возмущения были зарегистрированы следующие значения основных параметров: $V_{max} = 576$ км/с, $B_{max} = 19.5$ нТл, $AF = 6.2\%$, $D_{min} = -0.71\%$, $A_{x_{max}} = 4.29\%$, $Az_{range} = 1.55\%$, $KT_{min} = 0.35$, $Dst_{min} = -23$ нТл, $Ap_{max} = 39$.

На рисунке 2 приведен пример ФП из группы CME2 30 мая 2014 г., вызванного эрупцией волокна на юго-западе солнечного диска утром 26 мая. Во время этого межпланетного возмущения были зарегистрированы следующие значения основных параметров: $V_{max} = 358$ км/с, $B_{max} = 11.4$ нТл, $AF = 2\%$, $D_{min} = -0.35\%$, $A_{x_{max}} = 1.11\%$, $Az_{range} =$

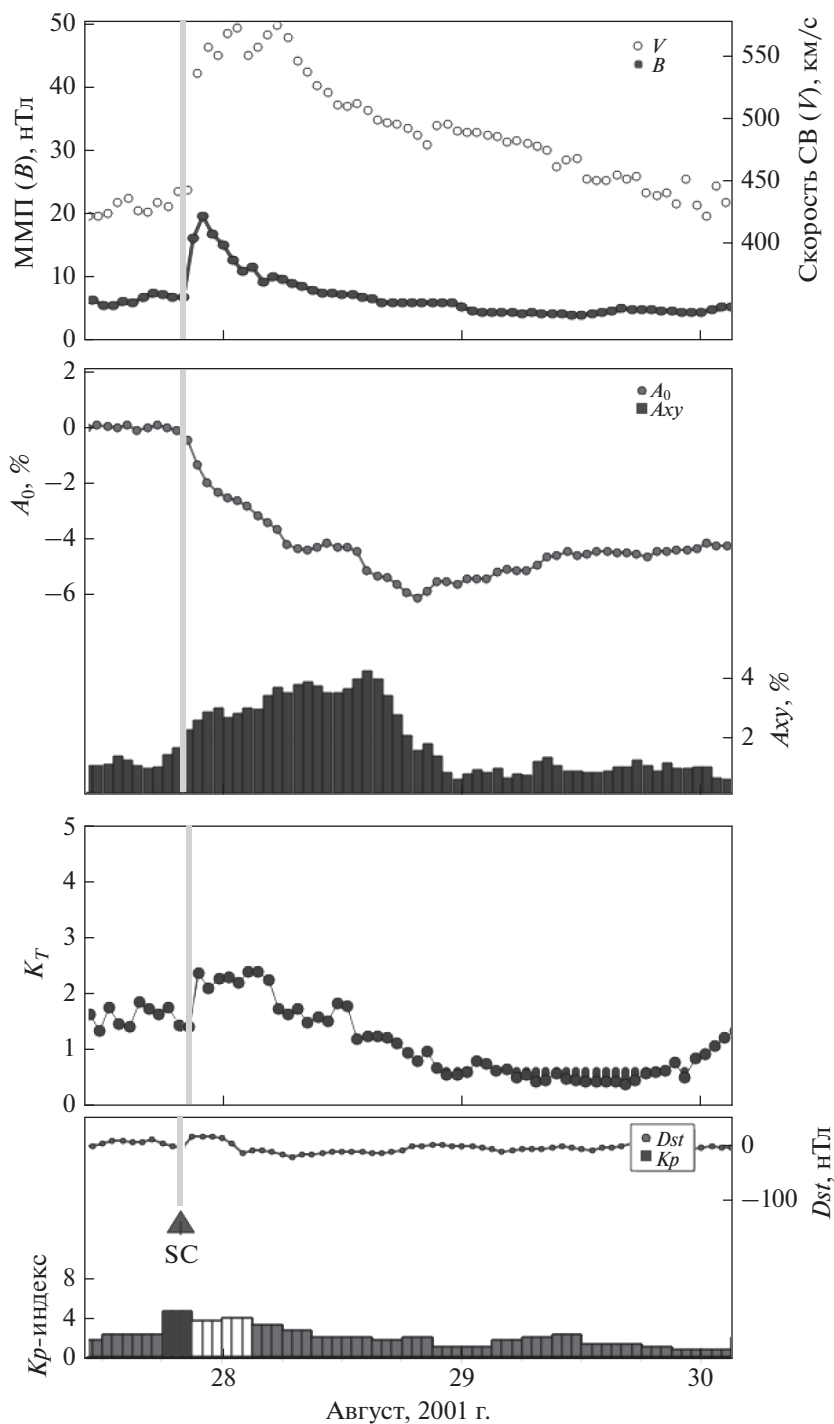


Рис. 1. Пример ФП, вызванного межпланетным возмущением, связанным с корональным выбросом из активной области (группа СМЕ1) 27 августа 2001 г.

$= 1.39\%$, $KT_{\min} = 0.29$, $Dst_{\min} = -28$ нТл, $Ap_{\max} = 32$.

На рисунке 3 приведен пример ФП из группы СН 6 февраля 2020 г., связанного с высокоскоростным потоком из корональной дыры, проходившей центральный меридиан солнечного диска 2–3 февраля. Во время этого межпланетного

возмущения были зарегистрированы следующие значения основных параметров: $V_{\max} = 639$ км/с, $B_{\max} = 9.5$ нТл, $AF = 0.9\%$, $D_{\min} = -0.26\%$, $Ax_{\max} = 0.8\%$, $Az_{\text{range}} = 0.67\%$, $KT_{\min} = 0.64$, $Dst_{\min} = -21$ нТл, $Ap_{\max} = 27$.

На рисунке 4 приведен пример ФП 21 апреля 2020 г., вошедший в группу МХ. Примерно за

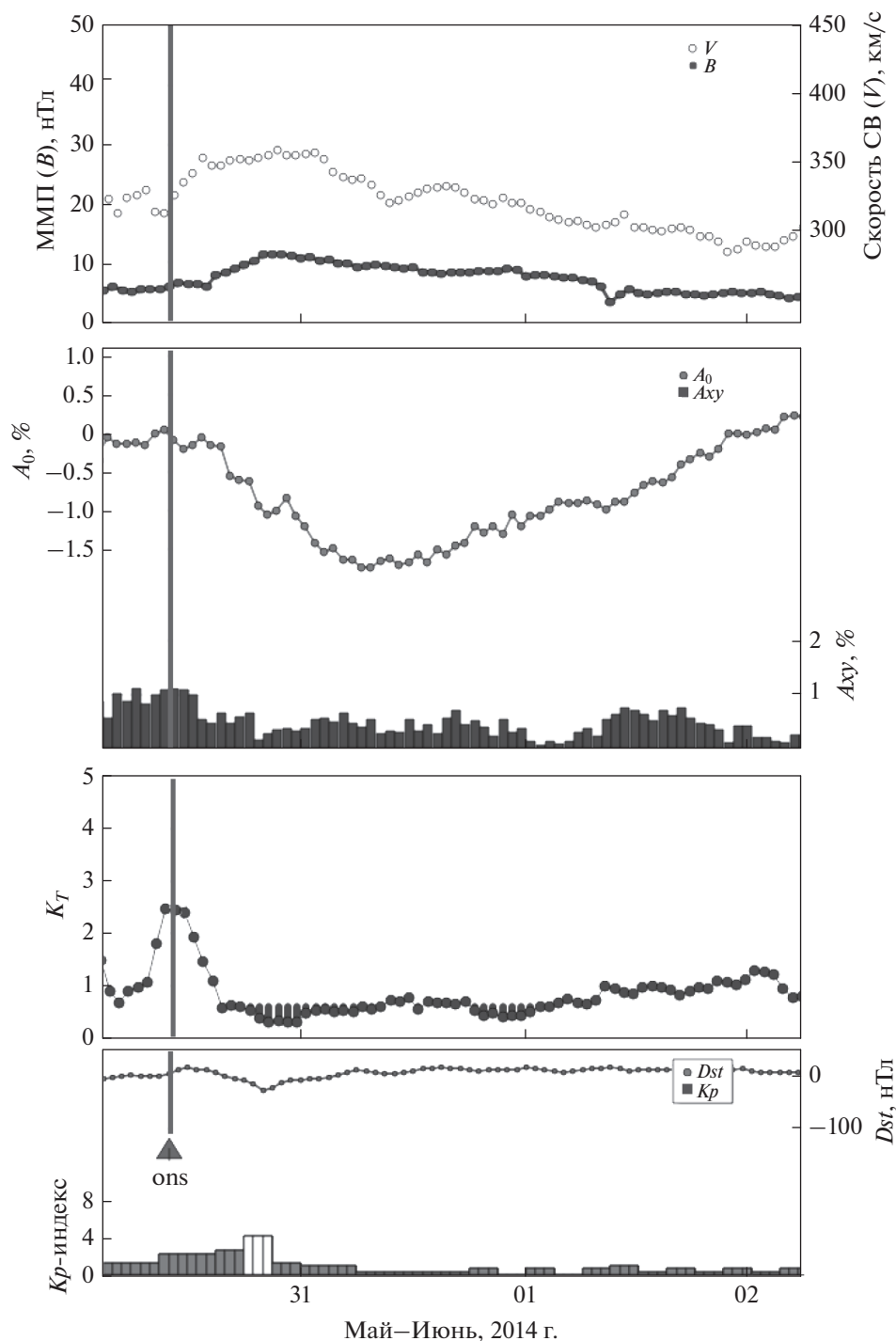


Рис. 2. Пример ФП, вызванного межпланетным возмущением, связанным с корональным выбросом вне активной области (группа СМЕ2) 30 мая 2014 г.

сутки перед рассматриваемым событием было зарегистрировано межпланетное возмущение, связанное с волоконным выбросом (15 апреля, на северо-востоке диска), которое не успело полностью проявиться из-за начала воздействия потока из трансэкваториальной корональной дыры

(проходила центральный меридиан 18 апреля). Отметим, что внутри потока из корональной дыры явно видны признаки СМЕ (периоды низких значений температурного индекса во второй половине 23 апреля). В этом межпланетном возмущении были зарегистрированы следующие зна-

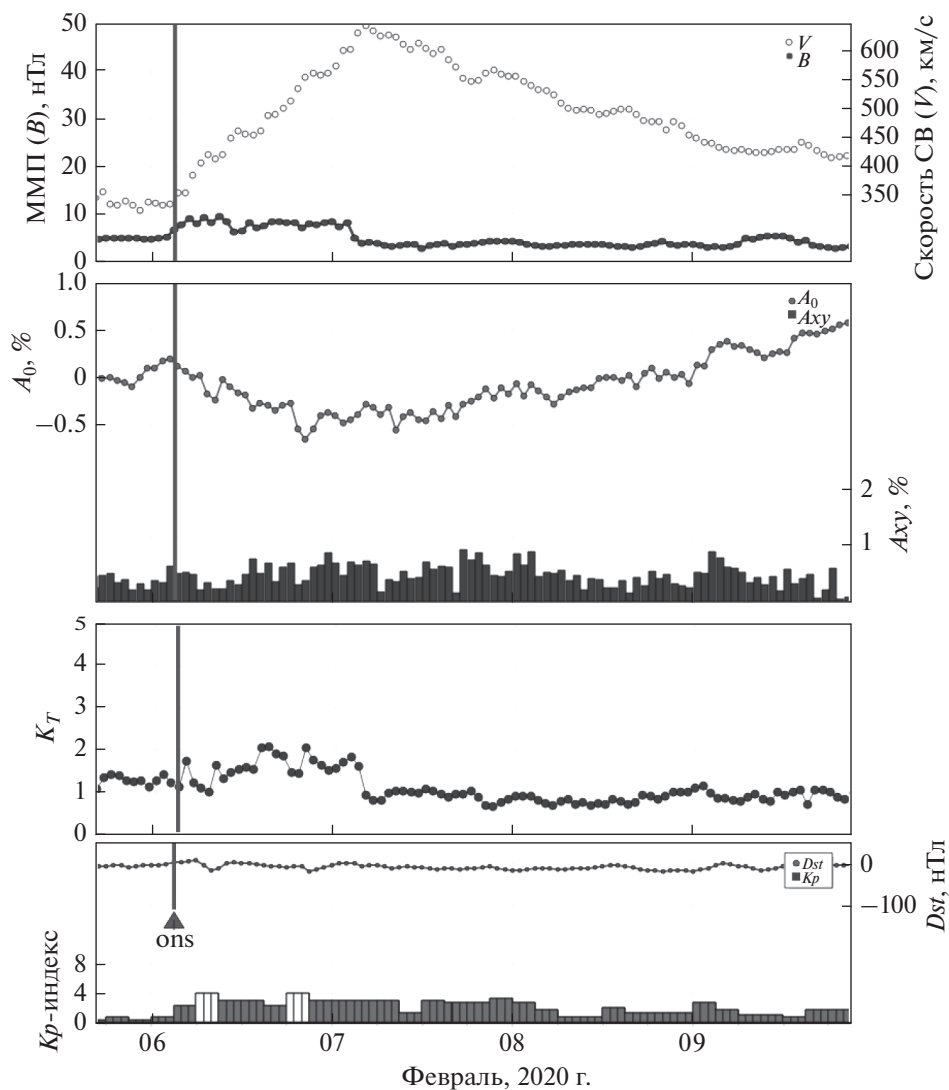


Рис. 3. Пример ФП, вызванного межпланетным возмущением, связанным с высокоскоростным потоком из корональной дыры (группа СН) 6 февраля 2020 г.

чения основных параметров: $V_{\max} = 490$ км/с, $B_{\max} = 11$ нТл, $AF = 0.6\%$, $D_{\min} = -0.13\%$, $A_{x\max} = 1.06\%$, $A_{z\text{range}} = 0.84\%$, $KT_{\min} = 0.44$, $Dst_{\min} = -28$ нТл, $A_{p\max} = 18$.

Далее мы рассмотрели статистические распределения параметров для указанных групп событий. На рисунке 5 представлены графики дополнительной кумулятивной функции распределения (CCDF) амплитуды ФП (AF) для четырех групп событий: группа СМЕ1 (299 событий), СМЕ2 (209 событий), СН (309 событий), MIX (692 события). Из рисунка видно, что распределения величины ФП в разных группах событий значительно отличаются друг от друга, причем наибольшие значения наблюдаются в группе СМЕ1 и затем, в порядке убывания, следуют группы СМЕ2, MIX, СН. Это вполне объяснимо, поскольку самые

большие величины скорости солнечного ветра и ММП наблюдаются в событиях группы СМЕ1. Применение критерия Колмогорова–Смирнова показало, что распределения исследуемых параметров не подчиняются нормальному закону, но соответствуют логнормальному закону в отдельных группах событий (B_{\max} – во всех четырех группах; V_{\max} – во всех группах, кроме СН; $A_{x\max}$, Dst_{\min} – во всех группах, кроме MIX; AF , $A_{z\text{range}}$ – в группах, связанных с СМЕ; KT_{\min} – в группе СН; $A_{p\max}$ – в группе СМЕ1). Логнормальное распределение – простейший тип распределений, описывающих мультипликативные 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 зависи-

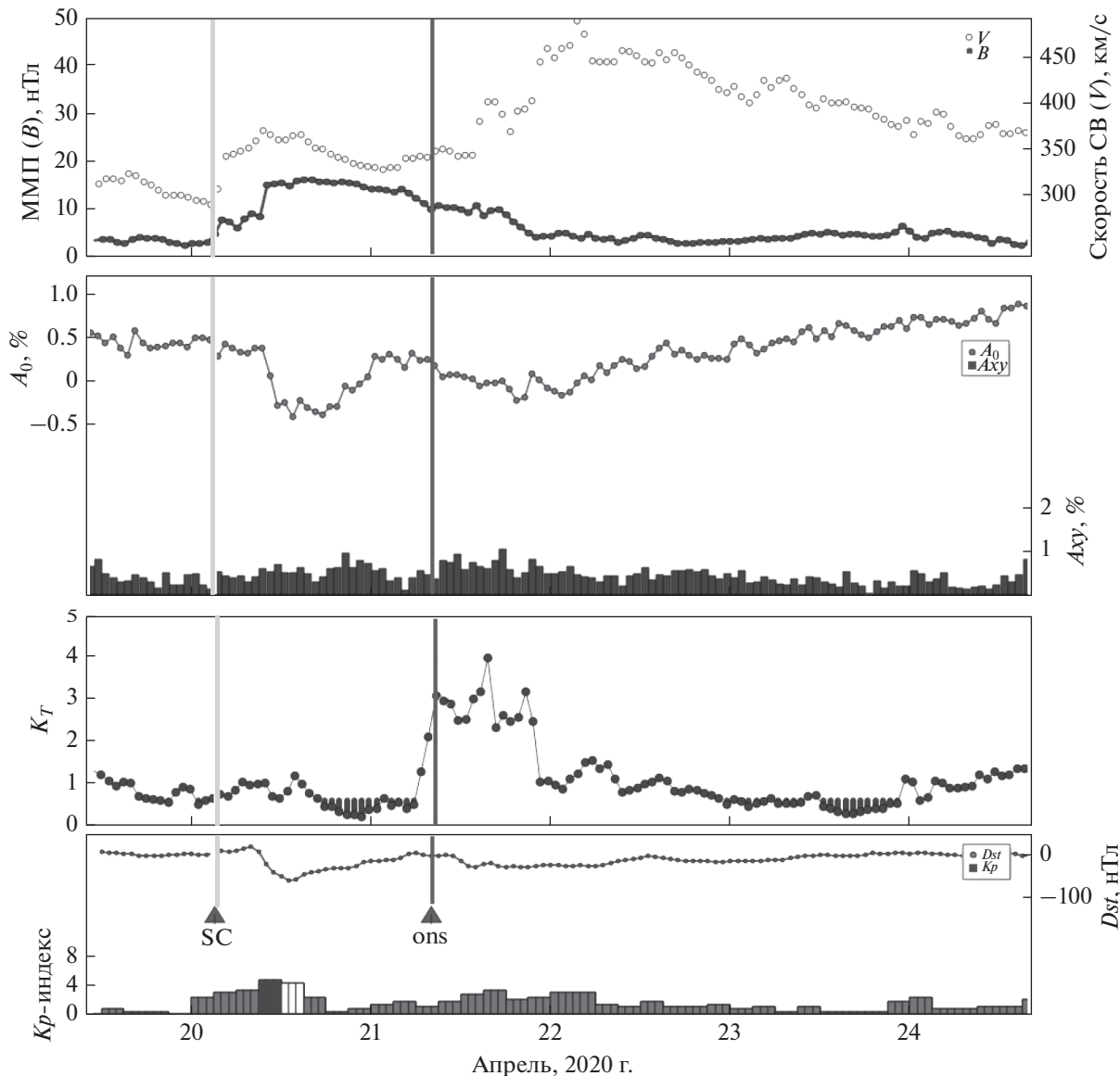


Рис. 4. Пример ФП, вызванного межпланетным возмущением, связанным с влиянием нескольких солнечных источников (группа М1Х) 21 апреля 2020 г.

мость отсутствует). Логнормальное распределение некоторых параметров ФП и вызывающих их межпланетных возмущений для рекуррентных и спорадических событий было отмечено в работах [Мелкумян и др., 2018; Melkumyan et al., 2019]. В таблице 1 представлены среднее и максимальное значения и квартили распределений параметров, а на рис. 6 – диаграммы размаха для четырех групп событий. На рисунке 6 не показаны экстремальные значения параметров: $AF = 28.0\%$; $A_{ху\max} = 5.76, 6.23, 10.42\%$; $B_{\max} = 54.8, 55.8, 62.0$ нТл; $V_{\max} = 1800, 1876$ км/с; $A_{p\max} = 400$ в группе СМЕ1 и $KT_{\min} = 4.06$ в группе СН. Из табл. 1 и рис. 6 видно, что в группе СМЕ2, и особенно в группе СМЕ1, распределения всех па-

раметров характеризуются существенной асимметрией и имеют длинные “хвосты” в области больших значений. Это связано с тем, что события внутри каждой из этих групп существенно различаются между собой: у них различные положения солнечных источников, соответствующие возмущения солнечного ветра по-разному взаимодействуют с межпланетной средой и имеют разные характеристики (скорость, ММП и др.). В группе СН распределения параметров AF , D_{\min} , Az_{range} , V_{\max} , $A_{p\max}$ почти симметричные, но отличаются от нормального закона за счет большого эксцесса (плосковершинные распределения). В отличие от ICME, межпланетные возмущения, обусловленные потоками из коро-

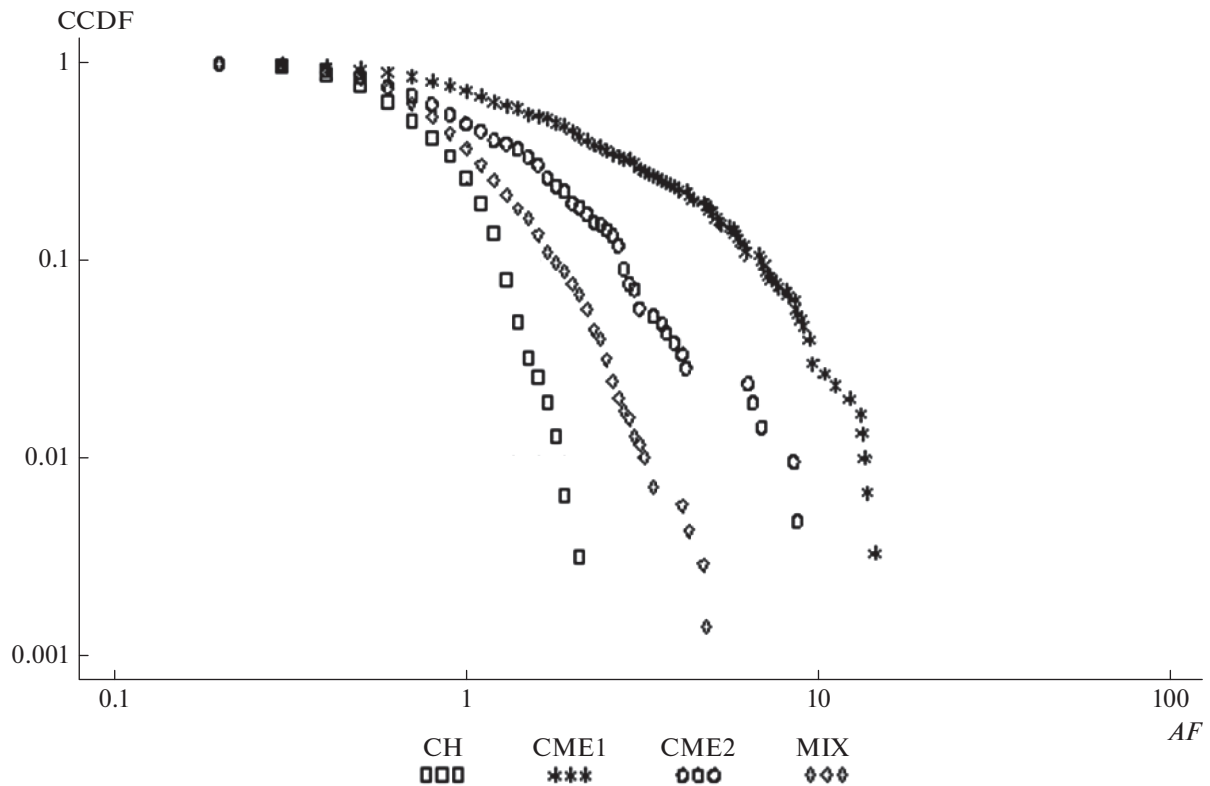


Рис. 5. Дополнительная кумулятивная функция распределения (CCDF) амплитуды ФП (AF) для групп событий CME1, CME2, MIX, CH.

нальных дыр, меньше отличаются друг от друга: они имеют меньший разброс скорости солнечного ветра и индукции ММП и не вызывают больших ФП. Излом в области больших значений амплитуды ФП связан с маленькой статистикой в этой области и с отсутствием ФП величиной от 4.3% до 6.2% в группе CME2.

Для сравнения распределений параметров в разных группах событий использовались медианы (*Median* – Med) в качестве меры центральной тенденции и межквартильные интервалы (*Interquartile Range* – IR) в качестве меры разброса. Значения этих характеристик показывают, что амплитуда ФП в группе CME1 (Med = 1.8%, IR = 1.0–3.7%) существенно больше, чем в группах CME2 (1.0%, 0.7–1.8%), MIX (0.9%, 0.6–1.3%) и CH (0.8%, 0.6–1.1%), причем группа CME1 выделяется не только более высокими значениями, но и значительно большим разбросом амплитуды. Похожая картина наблюдается при сравнении распределений параметра $A_{\text{утах}}$ (Med = 1.58%, IR = 1.17–2.23% для CME1), хотя здесь разница между группой CME2 (1.26%, 1.01–1.68%) и группами MIX (1.06%, 0.87–1.28%) и, особенно, CH (0.93%, 0.78–1.09%) существенно больше (межквартильные интервалы практически не пересекаются). Что касается параметров межпланетных возмущений, то из рис. 6 видно, что поведение

индукции ММП для разных групп событий, в общем, схоже с поведением параметров ФП (что и понятно, так как основное влияние на модуляцию КЛ оказывает именно магнитное поле), однако, для параметра $V_{\text{тах}}$ различия распределений в разных группах выражены слабее. Как будет показано ниже, разница между распределениями $V_{\text{тах}}$ существенно возрастает, если для ФП, связанных с CMEs, учесть наличие или отсутствие магнитного облака у Земли. Распределения скорости солнечного ветра $V_{\text{тах}}$ для групп CME1 (Med = 518 км/с, IR = 437–665 км/с), MIX (545 км/с, 467–626 км/с), CH (568 км/с, 488–655 км/с) отличаются, в основном, величиной асимметрии (положительная для CME1 и практически нулевая для MIX и CH), а для группы CME2 (Med = 443 км/с, IR = 338–512 км/с) – существенно более низкими значениями и меньшим разбросом. Более высокие значения скорости солнечного ветра для выбросов, связанных с солнечными вспышками, объясняют более резкое часовое падение плотности КЛ в группе CME1, чем в группе CME2 (табл. 1), и подтверждают ожидаемый профиль ФП в этих группах. Самые высокие значения скорости солнечного ветра наблюдаются в группах CME1 (~1800 км/с) и CME2 (~1000 км/с); минимальные значения в группе CH (347 км/с) больше, чем в группах

Таблица 1. Среднее и максимальные значения и квартили распределений параметров ФП и межпланетных возмущений для событий, связанных с разными типами солнечных источников

Параметр	Группа	Среднее	Медиана	25–75%	Максимум
<i>AF</i>	CME1	2.94 ± 0.18	1.8	1.0–3.7	28.0
	CME2	1.49 ± 0.10	1.0	0.7–1.8	9.8
	CH	0.84 ± 0.02	0.8	0.6–1.1	2.2
	MIX	1.05 ± 0.02	0.9	0.6–1.3	5.3
<i>Dmin</i>	CME1	0.61 ± 0.04	0.38	0.25–0.69	5.93
	CME2	0.36 ± 0.02	0.27	0.20–0.42	2.54
	CH	0.22 ± 0.00	0.21	0.17–0.25	0.74
	MIX	0.25 ± 0.00	0.23	0.19–0.28	0.95
<i>Axymax</i>	CME1	1.83 ± 0.06	1.58	1.17–2.23	10.42
	CME2	1.43 ± 0.04	1.26	1.01–1.68	4.41
	CH	0.95 ± 0.01	0.93	0.78–1.09	1.98
	MIX	1.13 ± 0.02	1.06	0.87–1.28	3.45
<i>Azrange</i>	CME1	1.48 ± 0.05	1.21	0.84–2.00	6.45
	CME2	1.14 ± 0.04	1.00	0.69–1.46	4.04
	CH	0.82 ± 0.01	0.81	0.68–0.93	1.53
	MIX	0.95 ± 0.01	0.90	0.70–1.13	3.29
<i>Bmax</i>	CME1	16.44 ± 0.55	13.7	9.8–19.5	62.0
	CME2	12.87 ± 0.42	11.6	8.5–15.5	49.9
	CH	10.65 ± 0.19	9.9	8.1–12.4	22.2
	MIX	11.42 ± 0.14	10.9	8.8–13.3	22.5
<i>Vmax</i>	CME1	561.2 ± 10.7	518	437–665	1876
	CME2	458.5 ± 6.7	443	388–512	1024
	CH	567.6 ± 6.0	568	488–655	821
	MIX	550.8 ± 4.0	545	467–626	928
<i>KTmin</i>	CME1	0.43 ± 0.02	0.33	0.16–0.58	2.41
	CME2	0.43 ± 0.02	0.35	0.19–0.56	2.19
	CH	0.62 ± 0.01	0.59	0.50–0.70	1.33
	MIX	0.58 ± 0.01	0.56	0.43–0.70	1.36
<i>-Dstmin</i>	CME1	67.8 ± 4.2	46	23–87	422
	CME2	46.3 ± 2.9	34	15–65	235
	CH	27.9 ± 1.0	26	15–38	126
	MIX	35.8 ± 0.9	27	19–46	162
<i>Apmax</i>	CME1	72.1 ± 4.4	39	22–94	400
	CME2	42.6 ± 3.0	27	15–56	236
	CH	30.4 ± 1.2	30	17–39	154
	MIX	34.2 ± 0.9	27	18–48	154

CME1 (300 км/с) и CME2 (296 км/с). Такое соотношение нижних порогов скорости можно объяснить тем, что многие наблюдаемые ФП вызваны ICMEs с низкими скоростями, в то время как ФП от потоков из корональных дыр с низкой скоростью регистрируются достаточно редко, потому что требуют еще более низкой скорости фонового

солнечного ветра. На рисунке 6 показаны также распределения минимального значения температурного индекса *KTmin* в разных группах событий. Для ФП, связанных с двумя типами CMEs, распределения параметра *KTmin* почти совпадают (*Med* = 0.33, *IR* = 0.16–0.58 для CME1 и 0.35, 0.19–0.56 для CME2), при этом верхние границы

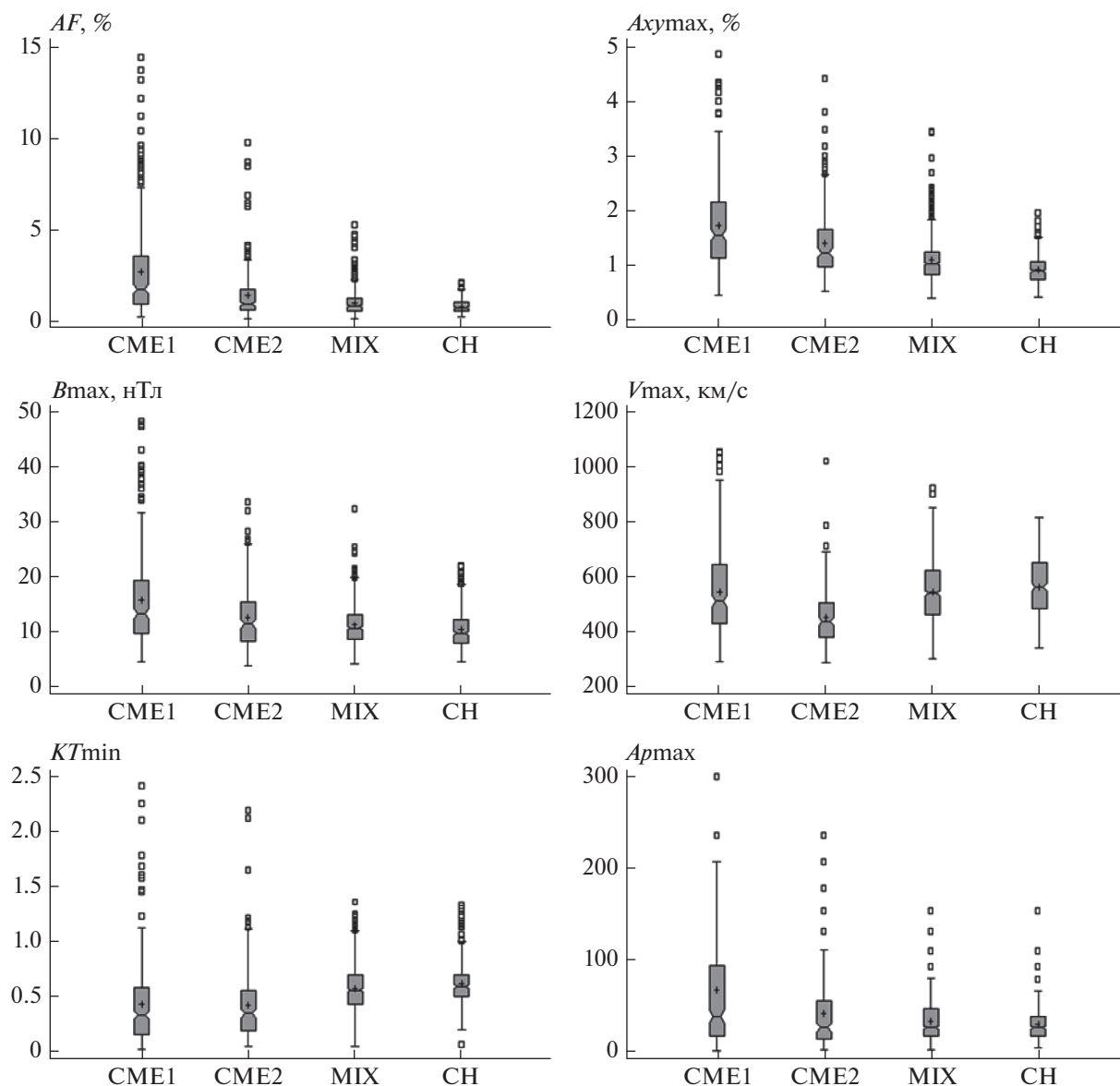


Рис. 6. Диаграммы размаха параметров AF , $A_{сuтaх}$, $B_{тaх}$, $V_{тaх}$, K_{Tmin} , $A_{рtах}$ в группах событий CME1, CME2, MIX, CH. Примечание: не показаны значения $AF = 28.0\%$, $A_{сuтaх} = 5.76, 6.23, 10.42\%$, $B_{тaх} = 54.8, 55.8, 62.0$ нТл, $V_{тaх} = 1800, 1876$ км/с, $A_{рtах} = 400$ в группе CME1 и $K_{Tmin} = 4.06$ в группе CH.

межквартильных интервалов близки к значению $KT = 0.5$, предложенному как верхний порог для выделения ICMEs в работе [Richardson and Cane, 1995] и подтвержденному в более поздних работах [например, Melkumyan et al., 2021]. Распределение параметра $KTmin$ в группах MIX (Med = 0.56, IR = 0.43–0.70) и CH (0.59, 0.50–0.70) также почти совпадают между собой, при этом нижняя граница интервала для группы CH строго, а для группы MIX приблизительно, совпадает с пороговым значением $KT = 0.5$. Таким образом, температурный индекс является надежным критерием для разделения ФП, вызванных ICMEs и высокоскоростными потоками из корональных дыр, но

не различает события, связанные с CMEs из активных областей и с волоконными выбросами. Значения параметра $A_{рtах}$ в группе CME1 (Med = 39, IR = 22–94) существенно больше, чем в группах CME2 (соответственно, 27 и 15–56), MIX (27, 18–48) и CH (30, 17–39), при этом группа CME1 выделяется не только более высокими значениями, но и значительно большим разбросом. В целом, поведение параметра $A_{рtах}$ для разных групп событий похоже на поведение параметра $B_{тaх}$, но отличается большей положительной асимметрией для спорадических ФП.

В таблице 2 представлены коэффициенты корреляции $r \geq 0.3$ между параметрами ФП и межпла-

Таблица 2. Парные коэффициенты корреляции $r \geq 0.3$ между параметрами ФП и межпланетных возмущений для ФП, связанных с разными типами солнечных и межпланетных источников (группы СМЕ1, СМЕ2, СН, MIX)

Группа	N	Параметры	AF	D_{min}	$A_{x_{max}}$	$A_{z_{range}}$
СМЕ1	299	V_{max}	0.72	0.71	0.48	0.54
		I_{max}	0.71	0.69	0.63	0.57
СМЕ2	209	V_{max}	0.69	0.68	0.54	0.41
		I_{max}	0.48	0.48	0.38	0.31
СН	309	V_{max}	0.62	0.43	0.34	0.30
		I_{max}	0.48	–	–	–
MIX	692	V_{max}	0.40	0.37	–	–
		I_{max}	0.34	–	–	–

нетных возмущений для событий, связанных с волоконными и вспышечными выбросами, высокоскоростными потоками из корональных дыр и несколькими источниками. Проверка по z -статистике показала, что коэффициенты корреляции параметров ФП с индукцией ММП в группе СМЕ1 ($r = 0.72$ для AF , 0.71 для D_{min} , 0.48 для $A_{x_{max}}$, 0.54 для $A_{z_{range}}$) отличаются статистически незначимо от группы СМЕ2 (соответственно, 0.69 , 0.68 , 0.54 , 0.41). В то же время, корреляция параметров ФП со скоростью солнечного ветра сильнее в группе СМЕ1 ($r = 0.71$ для AF , 0.69 для D_{min} , 0.63 для $A_{x_{max}}$, 0.57 для $A_{z_{range}}$), чем в группе СМЕ2 (соответственно, 0.48 , 0.48 , 0.38 , 0.31). Корреляция параметров ФП и межпланетных возмущений в группе СН значительная ($r = 0.62$) для амплитуды ФП и индукции ММП и умеренная для параметров $AF - I_{max}$ ($r = 0.48$), $D_{min} - V_{max}$ (0.43), $A_{x_{max}} - V_{max}$ (0.34), $A_{z_{range}} - V_{max}$ (0.30). Следует заметить, что максимальные значения поля наблюдаются в области взаимодействия, и достаточно тесная связь V_{max} и AF говорит о том, что ФП, связанные с потоками из корональных дыр, формируются именно в ней. Коэффициенты корреляции между индукцией ММП и скоростью солнечного ветра для разных групп событий различаются статистически незначимо ($r = 0.55$ в группе СМЕ1, 0.51 в группе СМЕ2, 0.47 в группе СН). Можно было бы ожидать, что самая тесная корреляция скорости солнечного ветра и индукции ММП будет в группе СН, потому что в этой группе величина поля, в основном, определяется разницей скоростей спокойного и высокоскоростного солнечного ветра, а в событиях, обусловленных ICMEs, ситуация сложнее, потому что максимум поля может наблюдаться как в области взаимодействия, так и в теле ICME. Так как события, связанные с потоками из корональных дыр, имеют существенно меньший диапазон изменения скорости солнечного ветра и индукции ММП, чем события, связанные со вспышечными и волоконными выбросами (табл. 1), то интересно сравнить корреля-

цию параметров $V_{max} - I_{max}$ в разных группах событий для интервала скоростей, характеризующего группу СН ($347 \text{ км/с} \leq V_{max} \leq 821 \text{ км/с}$). Для этих скоростей коэффициент корреляции между индукцией ММП и скоростью солнечного ветра в группе СН ($r = 0.47$, 309 событий) значимо больше, чем в группе СМЕ2 ($r = 0.34$, 193 события); коэффициент корреляции в группе СМЕ1 ($r = 0.50$, 275 событий) не отличается от коэффициента в группе СН, но превосходит значение коэффициента в группе СМЕ2. По-видимому, в группе СМЕ2 максимальное поле редко создается при взаимодействии межпланетного возмущения со спокойным солнечным ветром, поскольку скорость такого выброса, как правило, низкая. А максимальное поле чаще всего наблюдается в теле выброса и слабо коррелирует со скоростью. В группе СМЕ1 максимальные поля значительно чаще наблюдаются в области взаимодействия, а в тех случаях, когда максимум поля наблюдается в теле выброса, следует помнить, что в самых мощных событиях, как правило, и скорости высокие, и поля сильные.

3.2. ФП, вызванные ICMEs, в которых у Земли наблюдались (группы СМЕ1 + МС, СМЕ2 + МС) или не наблюдались (группы СМЕ1–МС, СМЕ2–МС) магнитные облака

Приведем примеры событий групп СМЕ1 + МС, СМЕ2 + МС. На рисунках 7–8 показано то же, что и на рис. 1–4, но чтобы нагляднее продемонстрировать особенности поведения ММП внутри магнитного облака [Burlaga et al., 1981], на верхней панели добавлены компоненты ММП (треугольник вверх – V_x , треугольник вниз – V_y , ромбы – V_z), заштрихованная область соответствует времени прохождения МС мимо Земли.

На рисунке 7 приведен пример ФП из группы СМЕ1 + МС 14 декабря 2006 г. ФП началось с регистрации ударной волны в 14:14 UT. Источником этого события был корональный выброс массы типа гало 13 декабря в 2:54 UT (со скоростью

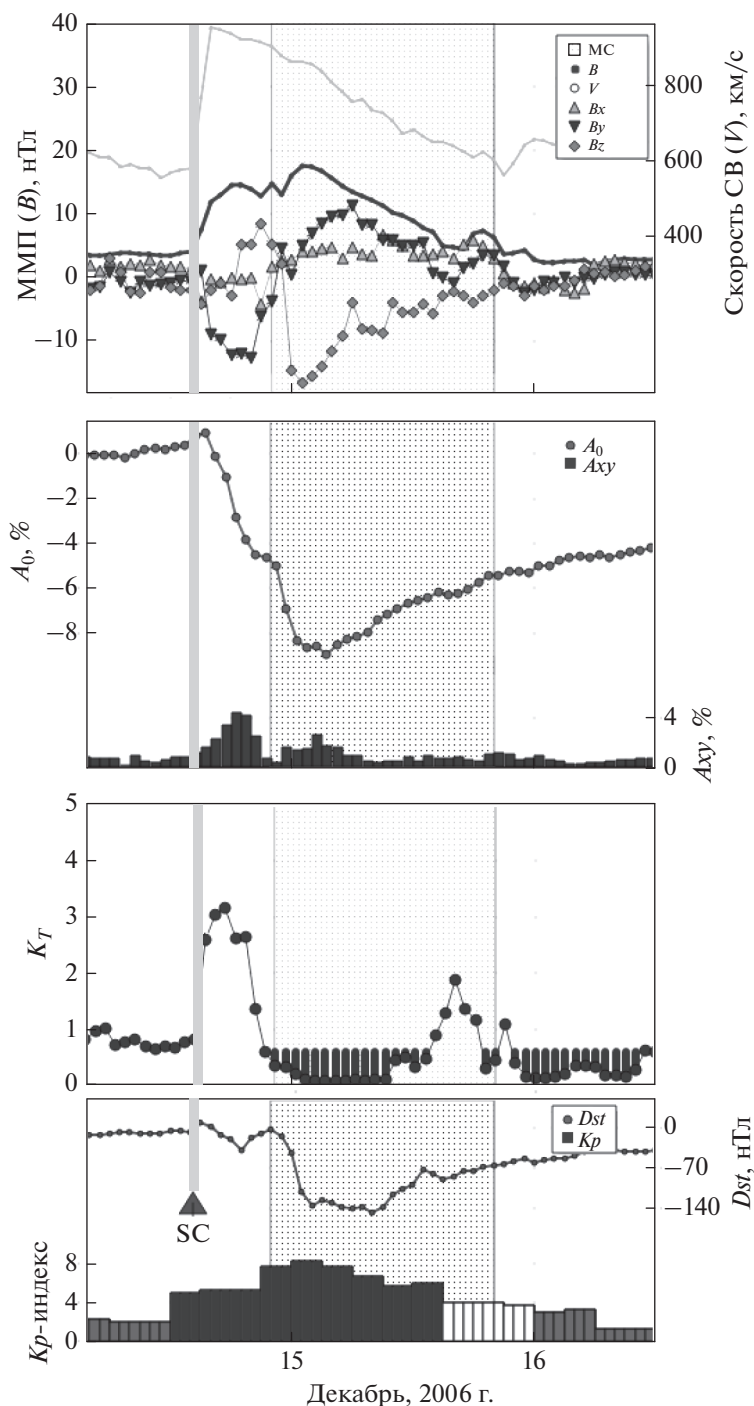


Рис. 7. Пример ФП, вызванного межпланетным возмущением, связанным с корональным выбросом из активной области, содержащим структуру магнитного облака (группа СМЕ1 + МС) 14 декабря 2006 г.

1774 км/с), связанный с большой вспышкой X3.4 (E06N23) в 2:14 UT 13 декабря. Во время этого межпланетного возмущения были зарегистрированы следующие значения основных параметров: $V_{\max} = 955$ км/с, $B_{\max} = 17.7$ нТл, $AF = 9.6\%$, $D_{\min} = -1.79\%$, $A_{x\max} = 4.35\%$, $A_{z\text{range}} = 1.52\%$, $KT_{\min} = 0.06$, $Dst_{\min} = -146$ нТл, $A_{p\max} = 236$.

Структура магнитного облака была зарегистрирована с 22:00 UT 14 декабря на протяжении 22 ч.

Форбуш-понижение 12 июля 2013 г. было вызвано межпланетным возмущением, связанным с корональным выбросом вне активной области с магнитным облаком и является примером группы СМЕ2 + МС (рис. 8). Источником данного ФП

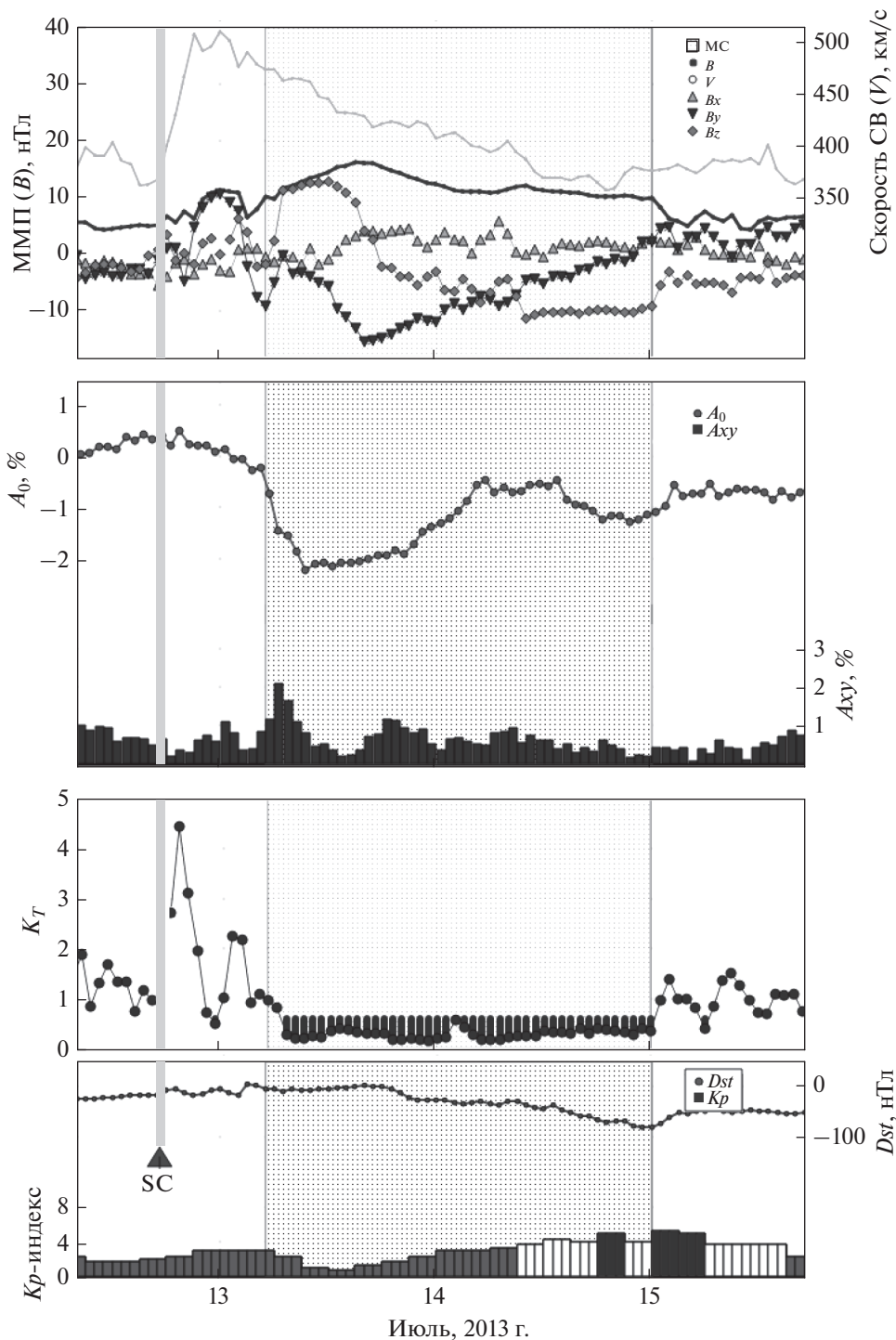


Рис. 8. Пример ФП, вызванного межпланетным возмущением, связанным с корональным выбросом вне активной области с магнитным облаком (группа СМЕ2 + МС) 12 июля 2013 г.

была эрупция волокна в центральной зоне солнечного диска 9 июля, СМЕ типа гало от которого было зарегистрировано на коронографе в 15:12 UT со скоростью распространения 449 км/с. Во вре-

мя этого межпланетного возмущения были зарегистрированы следующие значения основных параметров: $V_{max} = 509$ км/с, $B_{max} = 16.3$ нТл, $AF = 2.7\%$, $D_{min} = -0.66\%$, $A_{xumax} = 2.09\%$,

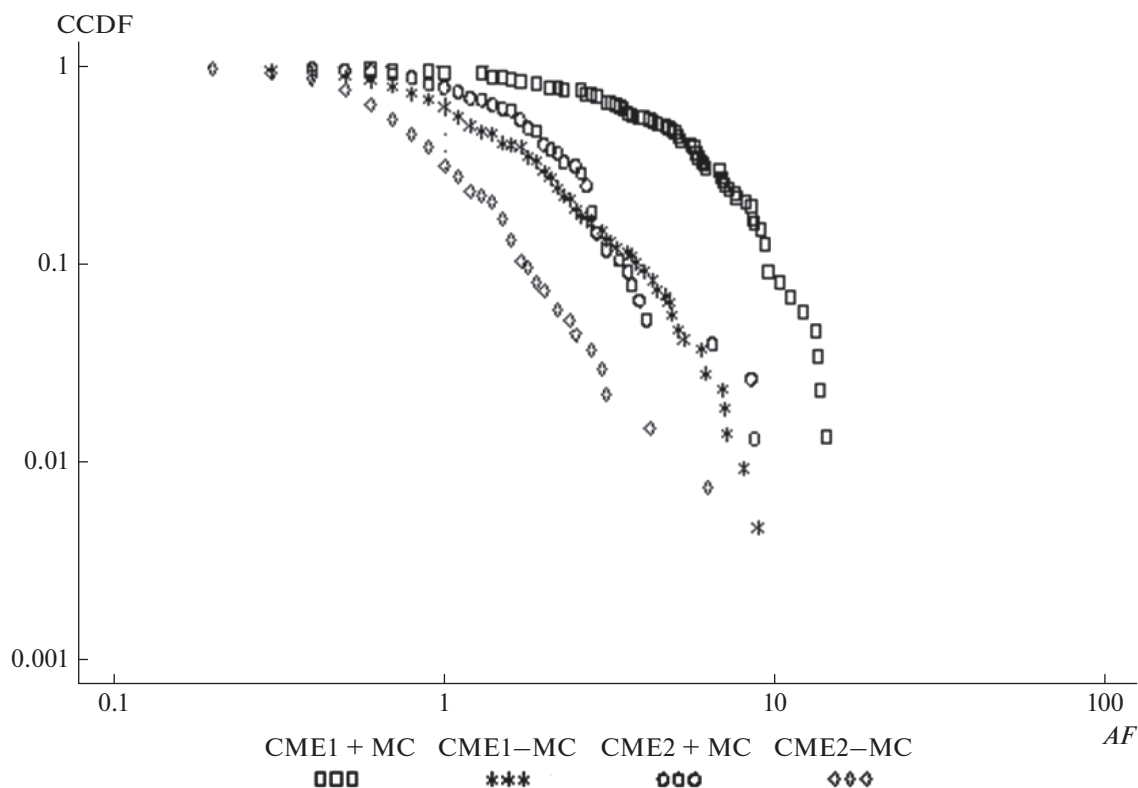


Рис. 9. Дополнительная кумулятивная функция распределения (CCDF) амплитуды ФП (AF) для групп событий SME1–MC, SME2–MC, SME1 + MC, SME2 + MC.

$Az_{range} = 0.89\%$, $KT_{min} = 0.15$, $Dst_{min} = -65$ нТл, $Ar_{max} = 32$. Магнитное облако проходило мимо Земли с 05:00 UT 13 июля на протяжении 43 ч.

Отметим, что примеры событий групп SME1–MC, SME2–MC приведены на рис. 1 и 2 соответственно.

На рисунке 9 представлены графики дополнительной кумулятивной функции распределения (CCDF) амплитуды ФП (AF) для четырех групп событий: SME1 + MC (86 событий), SME1–MC (213 событий), SME2 + MC (75 событий), SME2–MC (134 события). Из рисунка видно, что распределения амплитуды ФП в группах SME1 + MC (самые большие значения AF) и SME2–MC (наименьшие значения AF) значительно отличаются друг от друга и от остальных групп событий. Это подтверждает результаты, полученные, например, Абуниной и др. [2021], что магнитные облака эффективнее модулируют КЛ. В то же время распределения амплитуды ФП в группах SME1–MC и SME2 + MC (промежуточные значения AF) практически совпадают. Вычисление выборочных значений и уровня значимости статистики Колмогорова – Смирнова показало, что логнормальное распределение имеют: параметры Ax_{max} , Az_{range} , V_{max} , Dst_{min} – во всех четырех группах событий; B_{max} и KT_{min} – во всех группах, кроме

SME1–MC; AF – во всех группах, кроме SME2–MC; Ar_{max} – в группе SME1 + MC; D_{min} – в группе SME2 + MC. В таблице 3 представлены среднее и максимальное значения и квартили распределений параметров, а на рис. 10 – диаграммы размаха в четырех группах событий. На рисунке 10 не показаны экстремальные значения: $AF = 28.0\%$; $Ax_{max} = 10.42\%$; $B_{max} = 54.8$, 55.8 , 62.0 нТл; $V_{max} = 1800$, 1876 км/с; $Ar_{max} = 400$ в группе SME1 + MC и $Ax_{max} = 5.76$, 6.23% в группе SME1–MC. Из рисунка и таблицы видно, что для обоих типов SMEs распределения амплитуды ФП, индукции ММП и геомагнитных индексов отличаются более высоким уровнем и значительно большим разбросом значений при наличии магнитного облака у Земли. Для амплитуды ФП в группах SME1 + MC (Med = 4.75%, IR = 2.7–7.2%) и SME1–MC (1.3%, 0.8–2.3%), а также в группах SME2 + MC (1.8%, 1.2–2.8%) и SME2–MC (0.8%, 0.6–1.2%), межквартильные интервалы не пересекаются, а медианы отличаются в несколько раз. Как и следовало ожидать, значения индукции ММП для обоих типов SMEs существенно больше при наличии MC у Земли, чем при отсутствии. Кроме того, при наличии магнитных облаков индукция ММП для ФП, связанных с SMEs из активных областей (Med = 22.3 нТл, IR = 16.8–29.0 нТл), значительно выше,

Таблица 3. Среднее и максимальные значения и квартили распределений параметров ФП и межпланетных возмущений для событий, связанных с разными типами межпланетных источников

Параметр	Группа	Среднее	Медиана	25%–75%	Максимум
<i>AF</i>	CME1–MC	1.89 ± 0.12	1.3	0.8–2.3	13.2
	CME2–MC	1.07 ± 0.08	0.8	0.6–1.2	6.9
	CME1 + MC	5.46 ± 0.44	4.75	2.7–7.2	28
	CME2 + MC	2.24 ± 0.20	1.8	1.2–2.8	9.8
<i>Dmin</i>	CME1–MC	0.41 ± 0.02	0.31	0.21–0.46	2.70
	CME2–MC	0.29 ± 0.02	0.23	0.18–0.32	1.18
	CME1 + MC	1.11 ± 0.10	0.82	0.46–1.43	5.93
	CME2 + MC	0.48 ± 0.04	0.40	0.27–1.55	2.54
<i>Axymax</i>	CME1–MC	1.61 ± 0.05	1.46	1.05–1.94	6.23
	CME2–MC	1.29 ± 0.05	1.16	0.92–1.52	4.41
	CME1 + MC	2.37 ± 0.14	2.09	1.53–2.94	10.42
	CME2 + MC	1.67 ± 0.07	1.53	1.21–2.03	3.49
<i>Azrange</i>	CME1–MC	1.24 ± 0.05	1.09	0.73–1.52	3.58
	CME2–MC	1.07 ± 0.05	0.94	0.66–1.31	3.69
	CME1 + MC	2.04 ± 0.12	1.84	1.18–2.73	6.45
	CME2 + MC	1.28 ± 0.09	1.14	0.73–1.71	4.04
<i>Bmax</i>	CME1–MC	13.26 ± 0.45	11.5	9.2–15.8	48.2
	CME2–MC	10.77 ± 0.39	9.7	7.6–12.9	32.1
	CME1 + MC	24.27 ± 1.18	22.3	16.8–29.0	62.0
	CME2 + MC	16.77 ± 0.78	15.6	12.7–20.7	49.9
<i>Vmax</i>	CME1–MC	520.4 ± 9.3	489	423–578	1059
	CME2–MC	446.9 ± 7.8	428	375–503	793
	CME1 + MC	660.8 ± 25.9	611	497–734	1876
	CME2 + MC	479.1 ± 11.8	454	401–522	1024
<i>KTmin</i>	CME1–MC	0.54 ± 0.03	0.47	0.26–0.69	4.06
	CME2–MC	0.53 ± 0.03	0.48	0.29–0.67	2.19
	CME1 + MC	0.18 ± 0.01	0.14	0.09–0.23	0.77
	CME2 + MC	0.24 ± 0.02	0.20	0.13–0.31	0.67
<i>–Dstmin</i>	CME1–MC	48.0 ± 3.5	34	18–63	387
	CME2–MC	31.8 ± 2.4	25	12–46	155
	CME1 + MC	116.1 ± 9.4	91.5	56–141	422
	CME2 + MC	72.7 ± 5.7	65	31–139	235
<i>Armax</i>	CME1–MC	48.8 ± 3.7	27	15–56	300
	CME2–MC	29.7 ± 3.1	18	12–32	300
	CME1 + MC	131.2 ± 9.8	111	61–179	400
	CME2 + MC	69.4 ± 6.0	56	27–94	236

чем для ФП, связанных с волоконными выбросами вне активных областей (15.6 нТл, 12.7–20.7 нТл). При отсутствии магнитных облаков разница между этими распределениями незначительна (Med = 11.5 нТл, IR = 9.2–15.8 нТл для CME1–MC и 9.7 нТл, 7.6–12.9 нТл для CME2–MC). Распределение скорости солнечного ветра *Vmax* в группе

CME1 + MC (Med = 611 км/с, IR = 497–734 км/с) отличается от остальных групп событий, которые практически неразличимы между собой (Med = 489 км/с, IR = 423–578 км/с в группе CME1–MC; 454 км/с и 401–522 км/с в группе CME2 + MC; 428 км/с и 375–503 км/с в группе CME2–MC). Возможно, это отчасти связано с тем, что магнит-

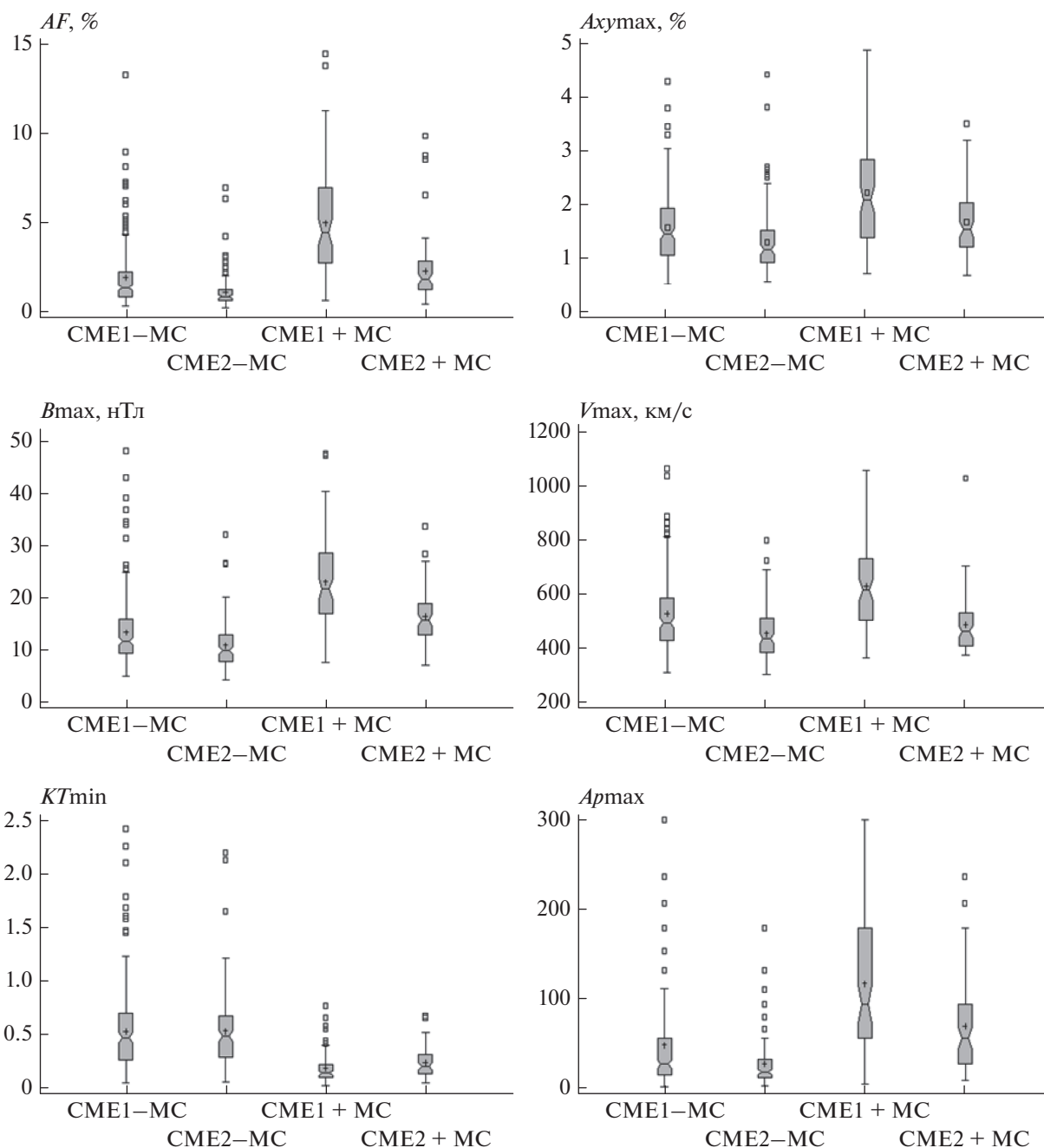


Рис. 10. Диаграммы размаха параметров AF , $A_{хутах}$, $B_{тах}$, $U_{тах}$, KT_{min} , $A_{ртах}$ в группах событий CME1-МС, CME2-МС, CME1 + МС, CME2 + МС. Примечание: не показаны значения $A_{хутах} = 5.76, 6.23\%$ в группе CME1-МС и $AF = 28.0\%$, $A_{хутах} = 10.42\%$, $B_{тах} = 54.8, 55.8, 62.0$ нТл, $U_{тах} = 1800, 1876$ км/с, $A_{ртах} = 400$ в группе CME1 + МС.

ные облака чаще регистрируются на Земле от центральных выбросов, для которых скорости выше, чем для периферийных. А также существенно, что медленные выбросы реже регистрируются в коронографах и поэтому отсутствуют в нашей статистике. Для температурного индекса KT_{min} распределения имеют существенно более низкий уровень и значительно меньший разброс при наличии магнитных облаков у Земли

(Med = 0.14, IR = 0.09–0.23 в группе CME1 + МС и 0.20, 0.13–0.31 в группе CME2 + МС), чем при отсутствии (соответственно, 0.47, 0.26–0.69 в группе CME1-МС и 0.48, 0.29–0.67 в группе CME2-МС). Отметим, что низкие температуры являются одним из характерных признаков магнитных облаков [Burlaga et al., 1981]. Как видно из рис. 10, поведение параметра $A_{ртах}$ похоже на поведение параметра $B_{тах}$, с той разницей, что

Таблица 4. Парные коэффициенты корреляции $r \geq 0.3$ между параметрами ФП и межпланетных возмущений для ФП, связанных с разными типами солнечных и межпланетных источников (группы СМЕ1 + МС, СМЕ1–МС, СМЕ2 + МС, СМЕ2–МС)

Группа	N	Параметры	AF	D_{min}	$A_{x_{max}}$	$A_{z_{range}}$
СМЕ1–МС	213	V_{max}	0.56	0.58	0.34	0.37
		I_{max}	0.55	0.55	0.45	0.40
СМЕ2–МС	134	V_{max}	0.68	0.60	0.55	0.41
		I_{max}	0.47	0.35	0.36	–
СМЕ1 + МС	86	V_{max}	0.66	0.66	0.41	0.50
		I_{max}	0.74	0.71	0.68	0.61
СМЕ2 + МС	75	V_{max}	0.59	0.66	0.41	0.36
		I_{max}	0.50	0.57	0.35	0.37

для геомагнитного индекса распределения в группах СМЕ1 + МС и СМЕ2 + МС отличаются слабее, а разброс значений и величина асимметрии при наличии магнитных облаков намного больше, что связано с разными конфигурациями магнитного поля внутри МС. Сравнивая рис. 6 и рис. 10, видим, что, в целом, при разделении спорадических событий двух типов на группы в зависимости от наличия или отсутствия магнитного облака у Земли, распределения параметров ФП и межпланетных, и геомагнитных возмущений отличаются сильнее.

В таблице 4 представлены значения коэффициентов корреляции между параметрами ФП и межпланетных возмущений для ФП, связанных с волоконными и вспышечными выбросами, при наличии или отсутствии магнитного облака у Земли. Анализ значений z -статистики и уровня значимости p показывает, что для СМЕs из активных областей коэффициенты корреляции параметров ФП с индукцией ММП при наличии МС ($r = 0.66$ для AF , 0.66 для D_{min} , 0.41 для $A_{x_{max}}$, 0.50 для $A_{z_{range}}$) или его отсутствии (соответственно, 0.56 , 0.58 , 0.34 , 0.37) отличаются статистически незначимо. В то же время, коэффициенты корреляции параметров ФП со скоростью солнечного ветра в группе СМЕ1 + МС ($r = 0.74$ для AF , 0.71 для D_{min} , 0.68 для $A_{x_{max}}$, 0.61 для $A_{z_{range}}$) значимо больше, чем в группе СМЕ1–МС (соответственно, 0.55 , 0.55 , 0.45 , 0.40). Наблюдаемая зависимость от скорости, видимо, объясняется местоположением солнечного источника, поскольку обычно магнитные облака на Земле регистрируются после выбросов в центральной зоне, тогда как отсутствие магнитного облака в выбросе может означать, что Земля оказалась в периферийной, более медленной части межпланетного возмущения. Сила корреляционной связи амплитуды ФП с индукцией ММП и со скоростью солнечного ветра в группе СМЕ1 практически одинакова как при наличии МС ($r = 0.66$ для V_{max} и 0.74 для I_{max}), так и при его

отсутствии (соответственно, 0.56 и 0.55). То же самое можно утверждать для параметров D_{min} и $A_{z_{range}}$ в обеих группах событий и экваториальной анизотропии КЛ в группе СМЕ1–МС. Исключение составляет экваториальная анизотропия КЛ в группе СМЕ1 + МС, зависящая от скорости солнечного ветра ($r = 0.68$) сильнее, чем от индукции ММП (0.41). Что касается ФП, связанных с волоконными выбросами, то коэффициенты корреляции параметров ФП и межпланетных возмущений в группах СМЕ2 + МС и СМЕ2–МС различаются статистически незначимо. В группе СМЕ2–МС коэффициенты корреляции параметров ФП с индукцией ММП ($r = 0.68$ для AF , 0.60 для D_{min} , 0.55 для $A_{x_{max}}$) больше, чем со скоростью солнечного ветра (соответственно, 0.47 , 0.35 , 0.36). В группе СМЕ2 + МС корреляция параметров ФП с ММП ($r = 0.59$ для AF , 0.66 для D_{min} , 0.41 для $A_{x_{max}}$, 0.36 для $A_{z_{range}}$) не отличается от корреляции со скоростью солнечного ветра ($r = 0.50$ для AF , 0.57 для D_{min} , 0.35 для $A_{x_{max}}$, 0.37 для $A_{z_{range}}$). Различия между коэффициентами корреляции ММП со скоростью солнечного ветра в четырех группах событий можно считать незначимыми ($r = 0.49$ в группе СМЕ1 + МС, 0.43 в группе СМЕ1–МС, 0.57 в группе СМЕ2 + МС, 0.44 в группе СМЕ2–МС).

4. ВЫВОДЫ

На большом экспериментальном материале (1509 событий с 1997 по 2020 гг.), с помощью статистических методов, исследовались параметры ФП (AF , D_{min} , $A_{x_{max}}$, $A_{z_{range}}$) и межпланетных (V_{max} , I_{max} , KT_{min}) и геомагнитных ($A_{p_{max}}$, $D_{st_{min}}$) возмущений для разных типов солнечных источников: корональные выбросы массы из активных областей, сопровождающиеся солнечными вспышками (группа СМЕ1); волоконные выбросы из регионов за пределами активных областей (группа СМЕ2); высокоскоростные потоки из корональных дыр (группа СН); смешанные со-

бытия (группа МІХ). Для спорадических ФП исследовалась также разница в поведении параметров при наличии (СМЕ1 + МС, СМЕ2 + МС) или отсутствии (СМЕ1–МС, СМЕ2–МС) магнитного облака у орбиты Земли.

Анализ распределений и статистических связей между параметрами показал:

1) для спорадических ФП распределения большинства параметров асимметричны и имеют длинные “хвосты” в области больших значений; для рекуррентных ФП распределения большинства параметров почти симметричны;

2) распределения амплитуды ФП, связанных с разными типами солнечных источников, значительно отличаются друг от друга, особенно, в группах СМЕ1 и СН;

3) наибольшие значения и разброс параметров ФП, индукции ММП и геомагнитных индексов наблюдаются в группе СМЕ1 + МС, наименьшие – в группе СН;

4) при наличии магнитного облака у Земли, индукция ММП значимо больше для ФП, связанных с СМЕs из активных областей, чем для ФП, связанных с волоконными выбросами вне активных областей; при отсутствии магнитного облака отличие распределений в этих группах незначительно;

5) скорость солнечного ветра характеризуется наименьшими величиной и разбросом в группе СМЕ2 (независимо от наличия магнитного облака); наибольшими – в группе СМЕ1 + МС; в остальных группах событий средние значения скорости близки по величине;

6) температурный индекс является хорошим критерием для разделения спорадических и рекуррентных ФП, надежно определяет наличие или отсутствие магнитного облака у Земли;

7) самые сильные корреляции между параметрами ФП и межпланетных возмущений наблюдаются в группе СМЕ1 + МС, самые слабые – в группах СН и МІХ;

8) наличие или отсутствие магнитного облака в межпланетном возмущении значимо влияет на распределение параметров ФП и геомагнитных возмущений.

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 NMDB (www.nmdb.eu). Работа базируется на экспериментальных данных УНУ “Российская национальная сеть станций космических лучей” (Сеть СКЛ).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

М.А. Абунина, А.А. Абунин, А.В. Белов, Н.С. Шлык поддержаны грантом Российского научного фонда (РНФ) № 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 аэронаука. Т. 52. № 3. С. 313–320. 2012.
- Абунина М.А., Белов А.В., Шлык Н.С., Ерошенко Е.А., Абунин А.А., Оленева В.А., Прямушкина И.И., Янке В.Г. Форбуш-эффекты, созданные выбросами солнечного вещества с магнитными облаками // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 61. № 5. С. 572–582. 2021.
- Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке Г.В., Оленева В.А., Абунина М.А., Абунин А.А. Метод глобальной съемки для мировой сети нейтронных мониторов // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 58. № 3. С. 374–389. 2018.
- Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // Космич. исслед. Т. 47. № 2. С. 99–113. 2009.
- 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 аэронаука. Т. 58. № 2. С. 163–176. 2018.
- 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 аэронаука. Т. 60. № 5. С. 547–556. 2020.
- Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Шлык Н.С., Абунин А.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Особенности поведения временных параметров Форбуш-понижений, связанных с разными типами солнечных и межпланетных источников // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 62. № 2. С. 155–170. 2022.
- Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А., Ерошенко Е.А., Абунин А.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Влияние взаимодействующих возмущений солнечного ветра на вариации галактических космических лучей // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 61. № 6. С. 694–703. 2021. <https://doi.org/10.31857/S0016794021060134>
- Badruddin, Yadav R.S., Yadav N.R. Influence of magnetic clouds on cosmic-ray intensity variation // Solar Phys. V. 105. № 5. P. 413–428. 1986.
- 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. P. 625–630. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(01\)00095-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00095-3)
- Belov A.V. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena / Proc. IAU Symposium. № 257. P. 119–130. 2009.
- Belov A., Abunin A., Abunina M., Eroshenko E., Oleneva V., Yanke V., Papaioannou A., Mavromichalaki H. Galactic cosmic ray density variations in magnetic clouds // Solar Phys. V. 290. № 5. P. 1429–1444. 2015.
- Burlaga L., Sittler E., Mariani F., Schwenn R. Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios, and

- IMP 8 observations // *J. Geophys. Res.* V. 86. № A8. P. 6673–6684. 1981.
- *Burlaga L.F., Plunkett S.P., St. Cyr O.C.* Successive CMEs and complex ejecta // *J. Geophys. Res.* V. 107. № A10. CiteID 1266. 2002.
- *Cane H.V.* Cosmic ray decreases and magnetic clouds // *J. Geophys. Res.* V. 98. № A3. P. 3509–3512. 1993.
- *Cane H.V.* CMEs and Forbush decreases // *Space Sci. Revs.* V. 93. № 1–2. P. 55–77. 2000.
- *Chaddock R.E.* Principles and methods of statistics (1st ed.). Boston: Houghton Mifflin Company, 471 p. 1925.
- *Corder G.W., Foreman D.I.* Nonparametric Statistics for Non-Statisticians. New Jersey. John Wiley and Sons, 264 p. 2009.
- *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.* V. 409. 012150. 2013.
- *Dumbović M., Vršnak B., Čalogović J., Župan R.* Cosmic ray modulation by different types of solar wind disturbances // *Astron. Astrophys.* V. 538. A28. 2012.
- *Dumbović M., Vršnak B., Čalogović J.* Forbush decrease prediction based on the remote solar observations // *Solar Phys.* V. 291. № 1. P. 285–302. 2016.
- *Forbush S.E.* On the effects in the cosmic-ray intensity observed during magnetic storms // *Phys. Rev.* V. 51. P. 1108–1109. 1937.
- *Gopalswamy N.* Coronal mass ejections: a summary of recent results / *Proc. 20th National Solar Physics Meeting.* Papradno, Slovakia, 2010. P. 108–130. 2010a.
- *Gopalswamy N., Akiyama S., Yashiro S., Mäkelä P.* Coronal Mass Ejections from Sunspot and non-Sunspot Regions / *Magnetic Coupling between the Interior and the Atmosphere of the Sun.* Eds. *Hasan S.S. and Rutten R.J.*, Astrophysics and Space Science Proc., Springer Berlin Heidelberg. P. 289–307. 2010b.
- *Gopalswamy N., Xie H., Mäkelä P., Akiyama S., Yashiro S., Kaiser M.L., Howard R.A., Bougeret J.-L.* Interplanetary shocks lacking type II radio bursts // *Astrophys. J.* V. 710. P. 1111–1126. 2010c.
- *Huttunen K.E.J., Schwenn R., Bothmer V., Koskinen H.E.J.* Properties and geoeffectiveness of magnetic clouds in the rising, maximum and early declining phases of solar cycle 23 // *Ann. Geophysicae.* V. 23. № 2. P. 625–641. 2005.
- *Iucci N., Parisi M., Storini M., Villaresi G.* Forbush decreases: origin and development in the interplanetary space // *Nuovo Cimento C.* V. 2. P. 1–52. 1979a.
- *Iucci N., Parisi M., Storini M., Villares G.* High-speed solar-wind streams and galactic cosmic-ray modulation // *Nuovo Cimento C.* V. 2. P. 421–438. 1979b.
- *Kim R.S., Gopalswamy N., Cho K.S., Moon Y.J., Yashiro S.* Propagation Characteristics of CMEs associated with Magnetic Clouds and Ejecta // *Solar Phys.* V. 284. № 1. P. 77–88. 2013.
- *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. A02104. 2005.
- *Kumar A., Badruddin.* Interplanetary mass ejections, associated features and transient modulation of galactic cosmic rays // *Solar Phys.* V. 289. № 6. P. 2177–2205. 2014a.
- *Kumar A., Badruddin.* Cosmic ray modulation due to high speed solar wind streams of different sources, speed, and duration // *Solar Phys.* V. 289. № 11. P. 4267–4296. 2014b.
- *Lockwood J.A.* Forbush decreases in the cosmic radiation // *Space Sci. Revs.* V. 12. № 5. P. 658–715. 1971.
- *Lockwood J.A., Webber W.R., Debrunner H. J.* Forbush decreases and interplanetary magnetic field disturbances: Association with magnetic clouds // *Geophys. Res.* V. 96. № A7. P. 11587–11604. 1991.
- *Lynch B.J., Zurbuchen T.H., Fisk L.A., Antiochos S.K.* Internal structure of magnetic clouds: Plasma and composition // *J. Geophys. Res. Space Phys.* V. 108. № A6. ID 1239. 2003.
- *Lynch B.J., Gruesbeck J.R., Zurbuchen T.H., Antiochos S.K.* Solar cycle-dependent helicity transport by magnetic clouds // *J. Geophys. Res.* V. 110. A08107. 2005.
- *Marubashi K., Lepping R.P.* Long-duration magnetic clouds: a comparison of analyses using torus- and cylinder-shaped flux ropes models // *Ann. Geophysicae.* V. 25. № 11. P. 2453–2477. 2007.
- *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.* V. 63. № 2. P. 1100–1109. 2019.
- *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.
- *Richardson I.G.* Energetic particles and corotating interaction regions in the solar wind // *Space Sci. Rev.* V. 111. № 3. P. 267–376. 2004.
- *Richardson I.G., Cane H.V.* Regions of abnormally low proton temperature in the solar wind (1965–1991) and their association with ejecta // *J. Geophys. Res.* V. 100. № A12. P. 23397–23412. 1995.
- *Richardson I.G., Cane H.V.* Near-Earth interplanetary coronal mass ejections during solar cycle 23 (1996–2009): Catalog and summary of properties // *Solar Phys.* V. 264. № 1. P. 189–237. 2010.
- *Richardson I., Cane H.* Galactic cosmic ray intensity response to interplanetary coronal mass ejections/magnetic clouds in 1995–2009 // *Solar Phys.* V. 270. № 2. P. 609–627. 2011.
- *Singh Y.P., Badruddin.* Effects of interplanetary magnetic clouds, interaction regions, and high-speed streams on the transient modulation of galactic cosmic rays // *J. Geophys. Res.* V. 112. A02101. 2007a.
- *Singh Y.P., Badruddin.* Corotating high-speed solar-wind streams and recurrent cosmic ray modulation // *J. Geophys. Res.* V. 112. A05101. 2007b.
- *Yashiro S., Gopalswamy N., Mäkelä P., Akiyama S.* Post-eruption arcades and interplanetary coronal mass ejections // *Solar Phys.* V. 284. № 1. P. 5–15. 2013.
- *Zhang G., Burlaga L.F.* Magnetic clouds, geomagnetic disturbances, and cosmic ray decreases // *J. Geophys. Res.* V. 93. № A4. P. 2511–2518. 1988.
- *Zhang J., Hess P., Poomvises W.* A Comparative study of coronal mass ejections with and without magnetic cloud structure near the earth: Are all interplanetary CMEs flux ropes? // *Solar Phys.* V. 284. № 1. P. 89–104. 2013.