

РАЗВИТИЕ ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЙ, СВЯЗАННЫХ С КОРОНАЛЬНЫМИ ВЫБРОСАМИ ИЗ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ И РЕГИОНОВ ВНЕ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

© 2023 г. А. А. Мелкумян^{1, *}, А. В. Белов^{1, **}, М. А. Абунина^{1, ***},
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), Москва, Троицк, Россия

*e-mail: amelkum@izmiran.ru

**e-mail: abelov@izmiran.ru

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

Поступила в редакцию 23.05.2022 г.

После доработки 27.06.2022 г.

Принята к публикации 20.07.2022 г.

По материалам созданной в ИЗМИРАН базы данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений исследовалось развитие Форбуш-понижений, связанных с корональными выбросами из активных областей, сопровождающимися солнечными вспышками, и волоконными выбросами вне активных областей. Сравнивалось развитие Форбуш-понижений двух типов в течение солнечных циклов 23–24, максимумов этих циклов и минимума между ними. С применением статистических методов, исследовались распределения интервалов времени от начала Форбуш-понижения до регистрации: минимальной плотности космических лучей, максимального часового понижения плотности, максимальной анизотропии космических лучей, максимума скорости солнечного ветра, максимума напряженности межпланетного магнитного поля, минимума *Dst*-индекса. Разница между развитием Форбуш-понижений двух типов сравнивалась, когда межпланетное возмущение содержит или не содержит магнитное облако у Земли. Результаты показали, что вспышечные события развиваются быстрее, чем волоконные, даже при близких значениях параметров солнечного ветра. Разница в развитии Форбуш-понижений двух типов заметнее в случае присутствия магнитного облака у орбиты Земли. Наибольшая разность между временными параметрами в двух типах событий наблюдается для времени регистрации максимальной напряженности межпланетного магнитного поля. Фаза спада Форбуш-понижений двух типов одинакова в максимуме цикла 23 и длиннее для волоконных событий в максимуме цикла 24 и минимуме 23–24. С учетом всех временных параметров, разница между развитием Форбуш-понижений двух типов заметнее в максимуме цикла 23 и в минимуме 23–24, чем в максимуме цикла 24.

DOI: 10.31857/S0016794022060098, EDN: ACTKXC

1. ВВЕДЕНИЕ

Форбуш-понижения (ФП) регистрируются нейтронными мониторами на Земле и демонстрируют относительно быстрое понижение плотности космических лучей (КЛ), сопровождаемое более медленным восстановлением [Forbush, 1937; Dorman, 1963; Lockwood, 1971]; как правило, ФП сопровождаются большими значениями анизотропии КЛ [Belov, 2009]. Большинство ФП имеют спорадический характер и вызываются межпланетными неоднородностями большого масштаба (Interplanetary Coronal Mass Ejections – ICMEs), связанными с корональными выбросами массы (Coronal Mass Ejections – CMEs) [Cane, 2000]. ФП, вызванные высокоскоростными потоками из корональных дыр, имеют рекуррентный харак-

тер [Richardson, 2004]. Влияние разных типов возмущений межпланетной среды на модуляцию галактических КЛ исследовалось во многих работах [например, Dumbović et al., 2012; Belov et al., 2014; Badruddin and Kumar, 2016; Melkumyan et al., 2019].

Одним из факторов, ответственных за разнообразие спорадических ФП, является различное происхождение вызывающих их межпланетных неоднородностей. В настоящей работе сравнивается временное развитие ФП, связанных с двумя типами солнечных источников: (1) корональными выбросами из активных областей (АО), сопровождающимися солнечными вспышками; (2) эрупциями солнечных волокон из регионов за пределами АО. Сравнение воздействия на гелиосферу

корональных выбросов массы из АО и извне активных областей представлено, например, в работе [Gopalswamy et al., 2010a]. В работе показано, что АО продуцируют почти все CMEs с энергией выше средней, геоэффективные CMEs, гало CMEs, а также CMEs, связанные с солнечными энергичными частицами и ударными волнами. Волоконные выбросы за пределами АО представляют собой другой тип CMEs. Они не коррелируют с солнечными пятнами и наблюдаются, в основном, в высоких гелиоширотах в периоды максимальной солнечной активности. Различия во влиянии на модуляцию КЛ выбросов из активных и неактивных областей показано в публикациях [Maričić et al., 2020, 2021], где для разных типов выбросов сравнивалось воздействие на ФП отдельных частей межпланетных неоднородностей (турбулентная оболочка и внутренняя часть ICME). В работах [Мелкумян и др., 2022а, б] сравнивались амплитудные и временные характеристики ФП, связанных с корональными выбросами массы из АО, сопровождающимися солнечными вспышками (вспышечные выбросы), и с эрупциями солнечных волокон (волоконными выбросами), а также с высокоскоростными потоками из корональных дыр и смешанными событиями. Было получено, что распределения как амплитудных, так и временных параметров значимо отличаются для ФП, связанных с разными типами солнечных источников. Можно предположить, что эта разница вызвана различными механизмами модуляции КЛ. Другой возможной причиной может быть тот факт, что все наиболее мощные межпланетные возмущения связаны с корональными выбросами из АО. В настоящей работе сравнивается временное развитие двух типов спорадических ФП при близких значениях параметров межпланетных возмущений.

Использование данных за длительный период времени – с 1997 по 2020 гг. – позволяет нам сравнивать развитие во времени ФП, связанных с разными типами солнечных источников, в различные периоды солнечной активности. Исследование модуляции КЛ на разных фазах солнечной активности в 23 и 24-м солнечных циклах (Solar Cycle – SC) проводилось во многих работах [например, Paouris et al., 2012; Гушина и др., 2014; Aslam, Badruddin, 2015; Lingri et al., 2016a, b; Мелкумян и др., 2018б]. Особенности временного развития ФП для рекуррентных и спорадических событий в солнечных циклах 23–24 представлены, например, в статье [Мелкумян и др., 2019]. В настоящей работе сравнивается развитие спорадических ФП, связанных с солнечными источниками разного происхождения, в течение солнечных циклов 23–24, в максимумах циклов и в минимуме циклов 23–24.

Во многих работах исследуется влияние магнитных облаков (Magnetic Cloud – MC) [Burlaga

et al., 1981] на модуляцию галактических КЛ [например, Badruddin et al., 1986; Zhang and Burlaga, 1988; Lockwood et al., 1991; Singh and Badruddin, 2007; Richardson and Cane, 2011a; Belov et al., 2015; Абунина и др., 2021]. По данным Belov et al. [2015] большинство магнитных облаков модулируют КЛ, уменьшая их плотность, причем внутри MC наблюдается наиболее глубокое падение плотности. Для MC характерны также большая регулярность и повышенная амплитуда ММП и аномально низкая протонная температура [Kim et al., 2013]; при прохождении MC геомагнитные индексы, как правило, имеют высокие значения [Richardson and Cane, 2011b]. Мелкумян и др. [2022б] сравнивали распределения амплитудных параметров вариаций КЛ, солнечного ветра (СВ) и геомагнитной активности для ФП, связанных с выбросами из активных областей и с волоконными выбросами, когда ICME содержит или не содержит MC около Земли. В настоящей работе приведены результаты сравнения распределений временных параметров ФП, связанных с CMEs из активных и неактивных областей, при наличии или отсутствии MC в теле выброса около Земли.

Временной профиль ФП может быть представлен главной фазой или фазой спада (от начала ФП до минимального значения плотности КЛ) и фазой восстановления (от минимума плотности КЛ до окончания существенных изменений плотности или начала следующего ФП) [Belov, 2009]. Зависимость продолжительности этих двух фаз от жесткости КЛ, от гелиодолготы солнечных источников и от параметров межпланетных неоднородностей исследовалась во многих работах. Согласно Lockwood et al. [1986], длительность фазы восстановления зависит от размера и скорости неоднородности СВ и от места входа Земли в неоднородность, но практически не зависит от жесткости частиц. В работах [Iucci et al., 1979; Cane et al., 1994] была отмечена зависимость временного профиля ФП от долготы солнечного источника. В работах [Абунина и др., 2013; Papaioannou et al., 2020] было показано, что ФП, связанные с западными солнечными источниками, развиваются быстрее и имеют более короткую продолжительность. Для описания временного развития ФП, кроме длительности главной фазы и фазы восстановления, используются также другие, более детальные, характеристики. Абунин и др. [2012], сравнивая события с внезапным (Storm Sudden Commencement – SSC) и постепенным началом, показали, что максимальное часовое понижение плотности КЛ регистрируется раньше в SSC-событиях. Белов и др. [2016] установили, что продолжительность фазы спада и время до максимального часового понижения плотности КЛ для SSC-событий минимальны при наибольших начальных вариациях плотности. Papaioannou et al. [2020], анализируя SSC-со-

бытия по времени задержки максимума ММП, показали, что ФП с большими амплитудами вызываются более быстро распространяющимися ICMEs. Мелкумян и др. [2019], используя время от начала ФП до регистрации максимальных значений вариации КЛ, часового понижения плотности КЛ и анизотропии КЛ, установили, что в максимуме цикла 23 спорадические события развиваются быстрее, чем рекуррентные. Мелкумян и др. [2018a, 2022a], кроме этих параметров развития спорадических и рекуррентных ФП, использовали для сравнения также время от начала ФП до регистрации максимумов ММП и скорости СВ. Результаты показали, что средние значения почти всех параметров временного развития меньше для спорадических, чем для рекуррентных событий. При этом разница между временными параметрами в двух группах событий: (1) очень большая для скорости СВ; (2) значительная для максимальной вариации плотности КЛ и максимального часового уменьшения плотности КЛ; (3) статистически значимая для величины ММП; (4) статистически незначимая для экваториальной анизотропии КЛ.

Таким образом, развитие ФП характеризуется временными параметрами, поведение которых определяется, в основном, особенностями межпланетных неоднородностей, вызывающих ФП: (1) длительность фазы восстановления зависит от размера и скорости межпланетной неоднородности и от места входа Земли в эту неоднородность; (2) длительность фазы спада зависит от гелиодолготы источника — для западных источников она короче, чем для восточных и центральных; (3) для ФП с внезапным началом более короткие фазы спада соответствуют наибольшим начальным вариациям плотности КЛ; (4) амплитуда ФП с внезапным началом больше для быстрее распространяющихся ICMEs; (5) спорадические ФП развиваются, как правило, быстрее, чем рекуррентные.

В настоящей работе мы используем шесть временных параметров для сравнения развития ФП, связанных с CMEs из АО и с волоконными выбросами вне АО, в том числе: (1) при близких значениях параметров СВ; (2) для разных периодов солнечной активности в циклах 23–24; (3) при наличии или отсутствии MC в ICME около Земли. Список временных параметров включает: продолжительность фазы спада, время от начала ФП до регистрации максимумов часового уменьшения плотности КЛ, экваториальной анизотропии КЛ, величины ММП, скорости СВ, а также до регистрации минимального в течение события *Dst*-индекса.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В работе использовались ФП с января 1997 по декабрь 2020 г. из базы данных Форбуш-эффек-

тов и межпланетных возмущений (Forbush Effects and Interplanetary Disturbances — FEID) (<http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html>). База данных содержит почасовые значения вариаций КЛ, параметров солнечного ветра [King and Papitashvili, 2005; (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>)], геомагнитных индексов [Matzka et al., 2021; (<ftp://ftp.gfz-potsdam.de/pub/home/obs/kp-ap/wdc/>), (<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/products/lgoes-x-ray>). Вариации плотности и анизотропии КЛ рассчитываются для частиц жесткости 10 ГВ на основе данных сети нейтронных мониторов методом глобальной съемки [Белов и др., 2018]. Процесс идентификации ФП с солнечными источниками описан в работах [Мелкумян и др., 2018a, 2022a]; списки магнитных облаков взяты из статей и онлайн-каталогов [Huttunen et al., 2005; Lynch et al., 2003, 2005; Marubashi and Lepping, 2007; Ермолаев и др., 2009; Gopalswamy et al., 2010b; Kim et al., 2013; Richardson and Cane, 2010; (https://wind.nasa.gov/mfi/mag_cloud_publ.html), (https://wind.nasa.gov/mfi/mag_cloud_S1.html), (http://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 представленной работе мы сравниваем развитие ФП во времени для следующих групп событий: (1) ФП, связанные с CMEs из АО (группа CME1), когда ICME содержит (CME1 + MC) или не содержит (CME1 – MC) магнитное облако около Земли; (2) ФП, связанные с волоконными выбросами за пределами АО (группа CME2) при наличии (CME2 + MC) или отсутствии (CME2 – MC) магнитного облака у орбиты Земли. Поведение временных параметров исследуется как для всего периода времени с января 1997 по декабрь 2020 г. (SC 23–24), так и для максимумов циклов 23 и 24 (Max 23, Max 24) и минимума между этими циклами (Min 23–24). Каждое ФП можно охарактеризовать его амплитудными параметрами, а именно: максимальными значениями вариации плотности КЛ (амплитуда ФП — A_F), часового уменьшения плотности КЛ (D_{min}), экваториальной анизотропии КЛ ($A_{x_{max}}$), индукции ММП (B_{max}), скорости солнечного ветра (V_{max}), модуля *Dst*-индекса (D_{stmin}). Развитие ФП характеризуется временными параметрами — интервалами времени от начала ФП до момента регистрации каждого из амплитудных параметров. Список временных параметров включает: T_{min} (продолжительность фазы спада), TD_{min} , $TA_{x_{max}}$, TV_{max} , TB_{max} , TD_{stmin} . За начало ФП принимается момент регистрации SSC (http://isgi.unistra.fr/data_download.php) или резкие изменения величины ММП и/или

скорости СВ (и/или вариаций КЛ, если SSC отсутствует).

Большой объем исследуемого материала позволяет использовать статистический анализ для сравнения развития ФП в разных группах событий и выборках из этих групп. Статистический подход к анализу данных предполагает, что свойства большого количества изучаемых объектов представляют доминирующие признаки индивидуального события. Для сравнения статистических свойств исследуемых параметров использовались средние значения, медианы и межквартильные интервалы (Interquartile Range – IQR); для сравнения распределений строились диаграммы размаха параметров в разных группах событий. С использованием медианных значений амплитуды ФП и временных параметров были построены схематические профили развития ФП для различных групп событий в разные периоды солнечной активности.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для анализа развития ФП, связанных с разными типами солнечных и межпланетных источников, рассчитывались статистические характеристики (средние значения, медианы, межквартильные интервалы) амплитуды ФП, индукции ММП, скорости СВ и временных параметров для следующих групп событий: (1) ФП, связанные с СМЕs из АО (группа СМЕ1, 303 события), когда ICME содержит (СМЕ1 + MC, 89 событий) или не содержит (СМЕ1 – MC, 214 событий) магнитное облако около Земли; (2) ФП, связанные с волоконными выбросами вне АО (группа СМЕ2, 209 событий) при наличии (СМЕ2 + MC, 75 событий) или отсутствии (СМЕ2 – MC, 134 события) магнитного облака у орбиты Земли. На рисунках 1 и 2 для этих групп событий показаны диаграммы размаха временных параметров. Из представленных диаграмм видно, что все временные параметры имеют, в среднем, большую величину в группе СМЕ2, чем в группе СМЕ1, т.е. ФП, связанные с выбросами из активных областей, развиваются быстрее. Наименьшая разница между двумя группами наблюдается для параметра T_{min} (СМЕ1: медиана = 15 ч, IQR = 8–22 ч; СМЕ2: 17 ч, 9–23 ч), наибольшая – для параметра T_{Vmax} (СМЕ1: медиана = 5 ч, IQR = 3–11 ч; СМЕ2: 12 ч, 5–22 ч). Последнее можно частично объяснить тем фактом, что повышенное магнитное поле внутри ICME может быть унаследовано из солнечного источника, а выбросы, ассоциированные с солнечной вспышкой, как правило, распространяются быстрее, чем волоконные [например, Chertok et al., 2013]. В группе СМЕ1 межквартильный интервал параметра T_{Dmin} (медиана = 6 ч, IQR = 2–11 ч) практически совпадает с интервалом параметра T_{Vmax} , что подтверждает суще-

ственную зависимость часового уменьшения плотности КЛ от величины ММП [например, Мелкумян и др., 2018a; Melkumyan et al., 2019]. В группе СМЕ2 время регистрации максимального часового уменьшения плотности КЛ (медиана = 9 ч, IQR = 4–17 ч) совпадает со временем регистрации максимума скорости СВ (медиана = 9 ч, IQR = 3–17 ч) и опережает регистрацию усиленного магнитного поля. Факт, что время регистрации максимальной скорости СВ значительно опережает время регистрации максимального значения ММП, может указывать на то, что в волоконных событиях усиленное поле чаще находится не в области взаимодействия, а в теле ICME, и потому приближается к Земле с меньшей скоростью. Это подтверждается и большим значением верхнего квартиля параметра T_{Vmax} (22 ч), показывающим, что в волоконных событиях появление максимума ММП как бы растягивается во времени. В группе СМЕ1 распределение T_{Vmax} (медиана = 6 ч, IQR = 3–12 ч) почти совпадает с распределением T_{Bmax} , т.е. для вспышечных событий самые сильные поля чаще наблюдаются в области взаимодействия межпланетного возмущения со спокойным СВ. В целом, в группе СМЕ1 максимальные значения часового уменьшения плотности КЛ, величины ММП и скорости СВ наблюдаются, в основном, в начале фазы спада, а в группе СМЕ2 – ближе к середине или в конце этой фазы.

В таблице 1 представлены средние значения, медианы и межквартильные интервалы амплитуды ФП, индукции ММП, скорости СВ и временных параметров для групп СМЕ1 и СМЕ2 и выборки из этих групп. Из таблицы следует, что в группе СМЕ1 гораздо больше событий с высокими значениями индукции ММП и скорости СВ, чем в группе СМЕ2. Для того, чтобы сравнить временное развитие ФП двух типов при близких значениях параметров солнечного ветра, в группах СМЕ1 и СМЕ2 были сделаны выборки с использованием следующих критериев: $B_{max} \leq 25$ нТл и $V_{max} \leq 700$ км/с (95%-ные границы значений параметров солнечного ветра в группе СМЕ2). Из таблицы 1 также видно, что количество ФП в выборке из группы СМЕ1 значительно меньше (226 событий), чем полное количество ФП в этой группе (303 события), а статистические характеристики параметров СВ в выборках СМЕ1 и СМЕ2 практически совпадают (особенно, для ММП). В то же время, значения всех временных параметров, кроме длительности фазы спада, остаются меньше для ФП, связанных с выбросами из активных областей. Наибольшая разница между выборочными значениями медиан наблюдается для параметра T_{Bmax} (СМЕ1: 5 ч, СМЕ2: 13 ч). Таким образом, максимальная величина ММП достигается значительно раньше для вспышечных, чем для волоконных событий, даже при

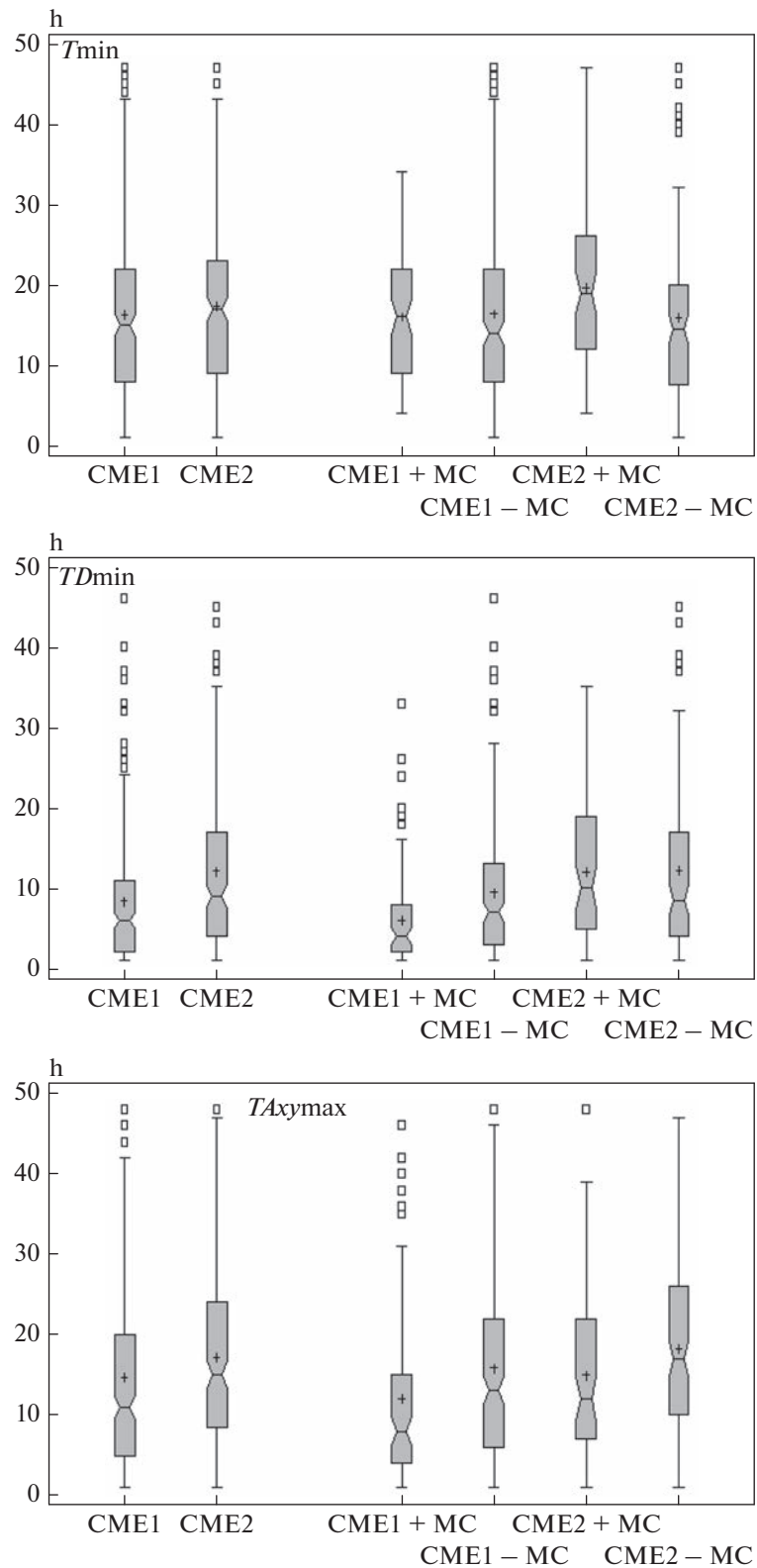


Рис. 1. Диаграммы размаха параметров T_{min} , TD_{min} , $T_{Ax_{max}}$ для разных групп событий. Крестик — среднее значение параметра, перемычка внутри прямоугольника — медиана, нижняя граница прямоугольника — 25%-ный квартиль, верхняя граница прямоугольника — 75%-ный квартиль, квадратики — выбросы.

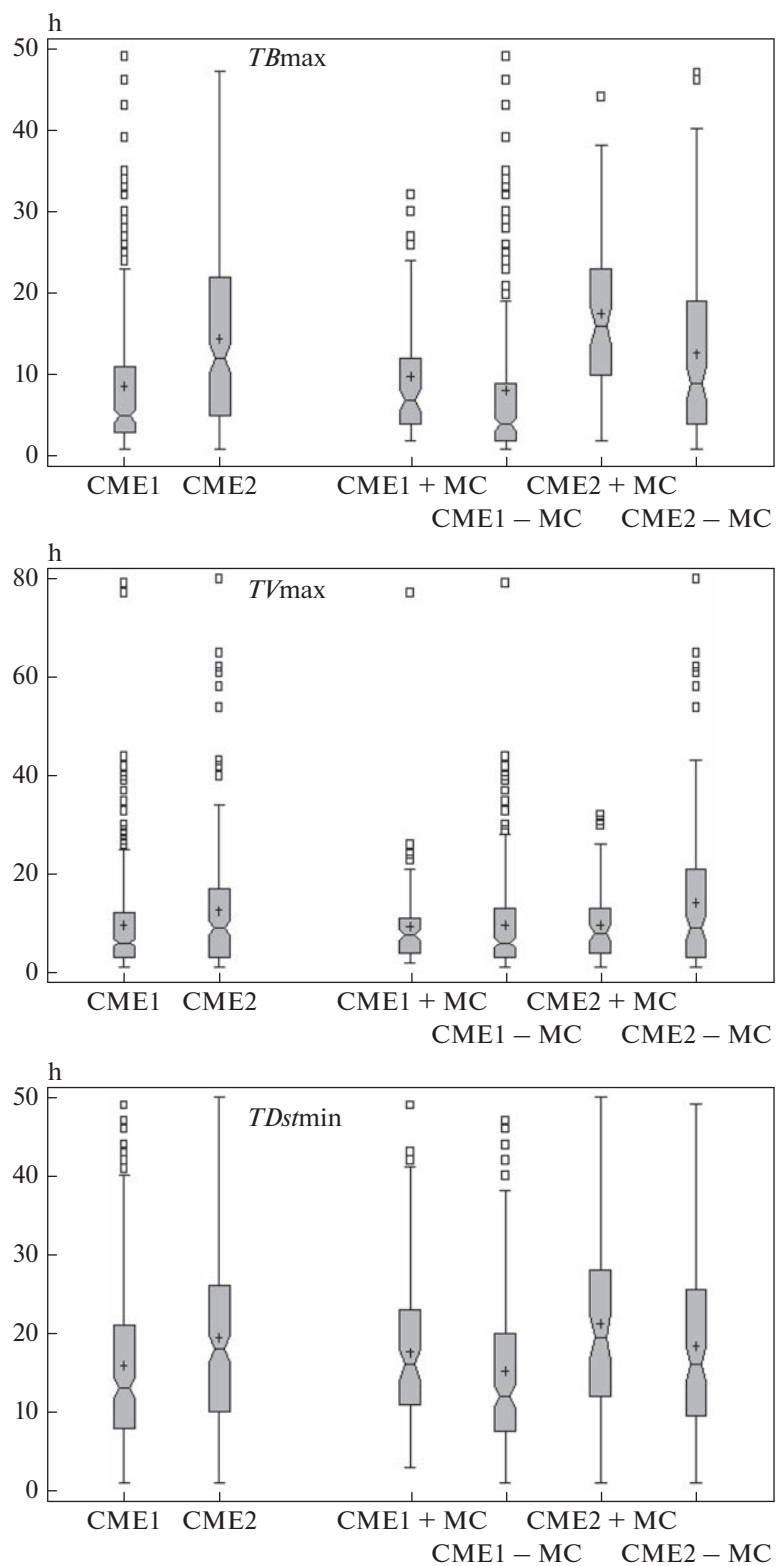


Рис. 2. Диаграммы размаха параметров TV_{max} , TB_{max} , TD_{stmin} для разных групп событий.

Таблица 1. Количество событий (N), средние значения, медианы и межквартильные интервалы амплитуды ФП (%), максимальной скорости СВ (км/с), максимальной индукции ММП (нТл) и временных параметров (ч) в группах CME1, CME2 и выборках из этих групп (критерии выбора: $B_{\max} \leq 25$ нТл, $V_{\max} \leq 700$ км/с)

Параметр	Статистика	Группы		Выборки	
		CME1	CME2	CME1	CME2
	N	303	209	226	198
A_F	Среднее	2.94 ± 0.07	1.49 ± 0.09	1.86 ± 0.10	1.35 ± 0.08
	Медиана	1.8	1.0	1.35	1.00
	IQR	1.0–3.7	0.7–1.8	0.9–2.3	0.7–1.7
$B_{\max}$	Среднее	16.44 ± 0.55	12.87 ± 0.42	12.88 ± 0.32	12.09 ± 0.33
	Медиана	13.7	11.6	11.8	11.5
	IQR	9.8–19.5	8.5–15.5	9.4–15.9	8.5–14.7
$V_{\max}$	Среднее	561.2 ± 10.7	458.5 ± 6.7	488.3 ± 6.1	447.6 ± 5.7
	Медиана	518	443	475	435
	IQR	437–665	388–512	422–549	387–502
$T_{\min}$	Среднее	16.3 ± 0.6	17.3 ± 0.8	16.1 ± 0.8	15.3 ± 0.8
	Медиана	15	17	15	14.5
	IQR	8–22	9–23	8–23	6–22
$TD_{\min}$	Среднее	8.4 ± 0.5	12.1 ± 0.7	8.0 ± 0.6	11.6 ± 0.8
	Медиана	6	9	6	8.5
	IQR	2–11	4–17	1–12	4–17
$TA_{\max}$	Среднее	14 ± 0.7	17.1 ± 0.9	14.9 ± 0.8	15.9 ± 0.9
	Медиана	11	15	11	13
	IQR	5–20	8–24	5–21	7–23
$TB_{\max}$	Среднее	8.7 ± 0.5	14.5 ± 0.8	9.6 ± 0.7	15.2 ± 0.8
	Медиана	5	12	5	13
	IQR	3–11	5–22	3–13	5–22
$TV_{\max}$	Среднее	9.6 ± 0.6	12.6 ± 0.9	9.6 ± 0.7	12.4 ± 0.9
	Медиана	6	9	6	8
	IQR	3–12	3–17	3–13	3–17
$TD_{\min}$	Среднее	16.0 ± 0.6	19.5 ± 0.8	14.9 ± 0.8	18.1 ± 0.9
	Медиана	13	18	12	17
	IQR	8–21	10–26	6–21	8–26

близких значениях параметров СВ. Малые значения параметра $TB_{\max}$ в выборке CME1 показывают, что для вспыхивающих выбросов усиленное магнитное поле чаще наблюдается в области взаимодействия, даже когда события далеки от самых мощных, в которых, как правило, и скорости высокие, и поля сильные. Значимая разница между медианами амплитуды ФП в двух выборках (CME1: 1.4%, CME2: 1.0%) показывает, что при тех же значениях магнитного поля и скорости СВ межпланетные возмущения, связанные с выбросами из АО, модулируют галактические КЛ более эффективно.

Медианы распределений амплитуды ФП и временных параметров в группах CME1 и CME2 были рассчитаны как для всего исследуемого периода, так и для максимумов и минимумов солнечных циклов 23–24. Полученные по результатам расчетов схематические профили развития ФП показаны на рис. 3. Из рисунка 3 видно, что для разных периодов солнечной активности в развитии спорадических ФП, связанных с различными типами солнечных источников, наблюдается как сходство, так и различие. В группе CME1 минимум плотности КЛ достигается немного раньше в Max 24 (13 ч), чем Max 23 (15 ч); в группе CME2

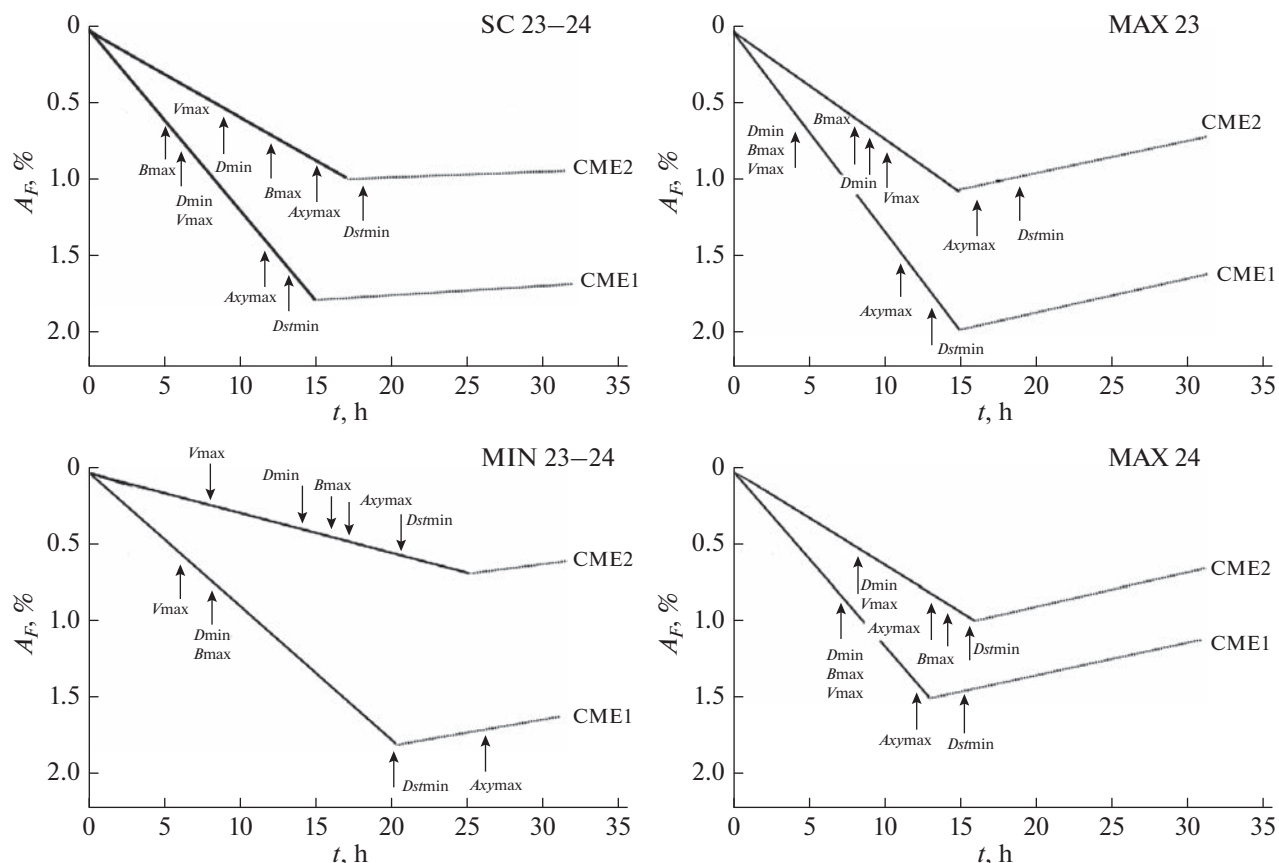


Рис. 3. Схематическое изображение среднего ФП в группах CME1, CME2 для разных периодов солнечной активности.

фаза спада длится примерно одинаково в Max 24 (16 ч) и Max 23 (15 ч). Таким образом, фаза спада одинакова для спорадических ФП двух типов в максимуме цикла 23 и короче для вспыхивающих событий, чем для волоконных, в максимуме цикла 24. При этом амплитуда ФП больше в Max 23, чем в Max 24, и для вспыхивающих (2.0 и 1.1%), и для волоконных (1.5 и 1.0%) событий. Что касается минимума солнечной активности, то длительность главной фазы ФП в нем гораздо больше, чем в максимумах для обеих групп событий. Надо заметить, что в Min 23–24 количество событий в группах CME1 (15 событий) и CME2 (17 событий) заметно меньше, чем в максимумах циклов 23 (106 событий в группе CME1 и 77 событий в группе CME2) и 24 (соответственно, 48 и 62 события). В минимуме солнечной активности в конце 24-го цикла количество событий в этих группах еще меньше, так что проводить анализ распределений параметров не имеет смысла. Малое количество спорадических ФП в минимуме циклов 24–25 не должно удивлять, так как солнечная активность в 24-м цикле и в минимуме этого цикла значительно слабее, и количество мощных CMEs значительно меньше, чем в предыдущих [например, Gopalswamy et al., 2020].

В группе CME1 параметры TD_{min} , TB_{max} , TV_{max} немного меньше в Max 23 (соответственно, 4.5, 5 и 5.5 ч), чем в Max 24 (7.5, 7 и 7 ч) и Min 23–24 (8, 8 и 6.5 ч). Параметры D_{min} , B_{max} , V_{max} регистрируются практически одновременно в начале фазы спада в максимуме цикла 23: усиленное магнитное поле в области взаимодействия вспыхивающих выбросов и спокойного СВ вызывает резкие изменения плотности КЛ. В максимуме цикла 24 (а также в Min 23–24) эти параметры тоже регистрируются почти одновременно, но в середине фазы спада. Максимум экваториальной анизотропии КЛ и минимум Dst -индекса регистрируются близко по времени в конце фазы спада или даже на фазе восстановления в обоих максимумах солнечной активности. В группе CME2 значения B_{max} наблюдаются значительно раньше в Max 23 (8 ч), чем в Max 24 (14 ч) и Min 23–24 (16 ч); значения V_{max} , наоборот, наблюдаются немного позже в Max 23 (10 ч), чем в Max 24 (8 ч) и Min 23–24 (8 ч). Максимальные значения величины ММП и скорости СВ близки по времени (разница на 2 ч) в Max 23 и существенно отличаются в Max 24 (на 6 ч) и Min 23–24 (на 8 ч). Отметим, что в группе CME2 значения этих параметров больше в Max 23 ($B_{max} = 13.6$ нТл, $V_{max} =$

= 463 км/с), чем в Max 24 ($B_{\max} = 9.6$ нТл, $V_{\max} = 397$ км/с) и Min 23–24 ($B_{\max} = 10.5$ нТл, $V_{\max} = 418$ км/с). Возможно, при меньших значениях ММП и скорости СВ, усиленные поля чаще связаны с телом ICME, чем с областью взаимодействия, и распространяются со сравнительно небольшой скоростью. Интервалы времени от начала ФП до регистрации максимальной экваториальной анизотропии КЛ для волоконных событий меньше в Max 24 (13 ч), чем в Max 23 (16 ч) и Min 23–24 (17 ч). Похожая картина наблюдается и для параметра $D_{\min}$ (соответственно, 16, 20 и 19 ч). Таким образом, в рассматриваемых трех фазах солнечной активности временные параметры меньше в группе CME1, чем в группе CME2, кроме $T_{\min}$ в Max 23 и $TD_{\min}$ в Max 24, характеризующихся одинаковыми медианами в двух группах событий. Из рисунка 3 видно, что вспышечные и волоконные события различаются в максимуме цикла 23 слабее, чем в максимуме цикла 24, по двум временным параметрам: длительности фазы спада (разность медиан 0 ч в Max 23 и 3 ч в Max 24) и времени регистрации $B_{\max}$ (соответственно, 3 и 7 ч). В целом, разница между развитием двух типов ФП значительно меньше в Max 24 (сумма разностей медиан 10.5 ч), чем в Max 23 (23 ч) и Min 23–24 (29.5 ч). Известно [например, Gopalswamy et al., 2020], что 24-й солнечный цикл слабее, чем цикл 23, так что полученные результаты соответствуют общей характеристике этих циклов: вспышечные и волоконные события менее различимы по временным параметрам из-за меньших различий в мощности возмущений СВ.

На рис. 1, 2 представлены диаграммы размаха временных параметров для групп ФП, связанных с CMEs из АО и с волоконными выбросами вне АО, при наличии (CME1 + MC, CME2 + MC) или отсутствии (CME1 – MC, CME2 – MC) магнитного облака в теле выброса у орбиты Земли. На рис. 4 показаны схематические профили развития ФП, построенные по медианным значениям амплитуды ФП и временных параметров, для этих групп событий. В работе [Мелкумян и др., 2022б] было показано, что амплитуды ФП значительно отличаются в зависимости от типа солнечного источника; в работах [Richardson and Cane, 2011a; Belov et al., 2015] авторы показали, что наличие MC в событии значительно увеличивает амплитуду ФП. По результатам, полученным в настоящей работе, можно добавить, что на модуляцию КЛ значительно влияет как наличие MC, так и тип солнечного источника: $A_F = 4.8\%$ в группе CME1 + MC, $A_F = 1.8\%$ в группе CME2 + MC, $A_F = 1.3\%$ в группе CME1 – MC и $A_F = 0.8\%$ в группе CME2 – MC. Что касается временного развития, то из рисунков 1, 2, 4 видно, что фаза спада практически одинакова в группах CME1 – MC (медиана = 14 ч, IQR = 8–22 ч) и CME2 – MC (медиана = 14 ч, IQR = 8–20 ч), немного длиннее в группе CME1 +

+ MC (медиана = 16 ч, IQR = 9–22 ч) и значительно длиннее в группе CME2 + MC (медиана = 19 ч, IQR = 12–26 ч). Таким образом, средняя продолжительность фазы спада увеличивается, если ICME содержит MC у орбиты Земли, особенно для ФП, связанных с волоконными выбросами. Длительность фазы спада для ФП двух типов одинакова, если ICME не содержит MC, и больше для ФП, связанных с волоконными выбросами, если ICME содержит MC у Земли. Для вспышечных событий распределение параметра $TD_{\min}$ более компактное и характеризуется меньшими значениями при наличии зарегистрированного MC (медиана = 4 ч, IQR = 2–8 ч), чем в случае, когда MC не наблюдается (7 ч, 3–13 ч). Для волоконных событий характер зависимости противоположный: $TD_{\min}$ немного больше при наличии МО (медиана = 10 ч, IQR = 5–19 ч), чем при отсутствии (8 ч, 4–17 ч). Разница между значениями параметра $TD_{\min}$ для ФП, связанных с выбросами из АО и извне АО, проявляется значительно сильнее, когда ICME содержит MC у Земли (6 ч), чем когда облако отсутствует (1 ч). Максимальная анизотропия КЛ регистрируется раньше в присутствии MC как для вспышечных событий (CME1 + MC: медиана = 8 ч, IQR = 4–15 ч; CME1 – MC: 13 ч, 6–22 ч), так и для волоконных (CME2 + MC: медиана = 12 ч, IQR = 7–22 ч; CME2 – MC: 17 ч, 10–26 ч). Большая разница (7 ч) верхних квартилей распределений в группах CME1 + MC и CME2 + MC дает возможность считать запаздывание максимальной анизотропии в волоконных ФП относительно вспышечных более значимым в присутствии MC у Земли. Сильнее всего (на 9 ч) эти два типа событий отличаются по времени регистрации максимального ММП в присутствии MC у Земли – межквартильные интервалы вспышечных (медиана = 7 ч, IQR = 4–12 ч) и волоконных (16 ч, 10–23 ч) событий практически не пересекаются. В отсутствие MC у Земли, время регистрации максимального ММП уменьшается как для вспышечных (медиана = 4 ч, IQR = 2–9 ч), так и для волоконных (10 ч, 4–19 ч) событий, но разница для двух типов событий остается значимой (6 ч). Максимум ММП регистрируется значительно раньше в группе CME1 + MC, чем в группе CME2 + MC, поскольку во вспышечных событиях максимальное поле чаще бывает в области взаимодействия, а в волоконных – в теле магнитного облака. Отметим, что в работе [Абунина и др., 2021] было показано, что время максимума ММП в MC может регистрироваться как в начале, так и в середине и в конце MC. Там же было показано, что регистрация максимального значения модуля ММП в конце MC связана со взаимодействующими возмущениями. Иными словами, максимальное значение модуля ММП наблюдается в момент, когда на еще не закончившееся МО налетает следующее межпла-

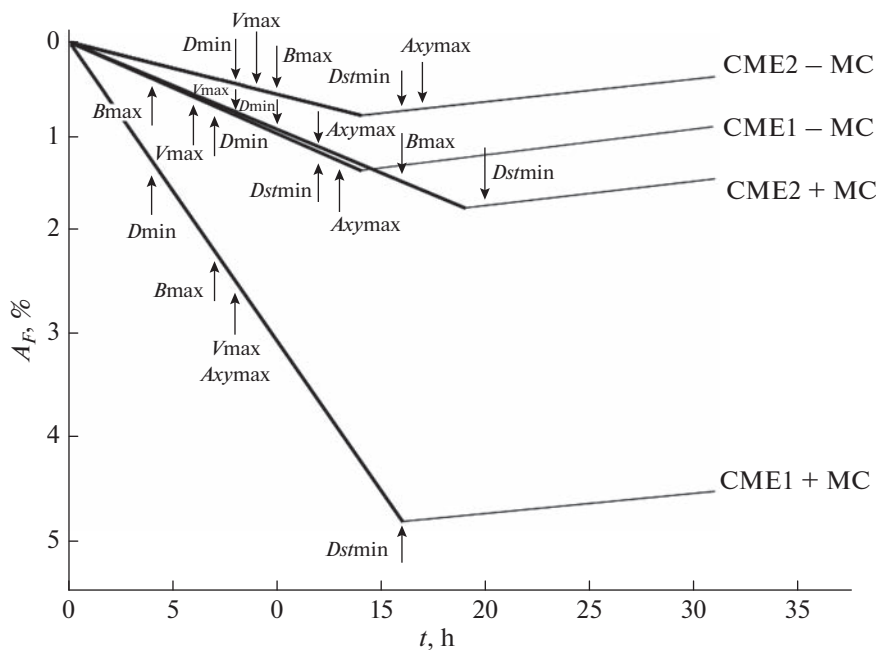


Рис. 4. Схематическое изображение среднего ФП в группах CME1 + MC, CME1 – MC, CME2 + MC, CME2 – MC.

нетное возмущение. В настоящей работе показано, что время регистрации максимального значения ММП в событиях, как с MC, так и без него, зависит от типа солнечного источника, но при наличии MC разница времен существенно больше. Что касается скорости СВ, то время регистрации ее максимального значения в группах CME1 + MC (медиана = 8 ч, IQR = 4–11 ч), CME1 – MC (6 ч, 3–13 ч) и CME2 + MC (8 ч, 4–13 ч) почти совпадает. Можно утверждать, что параметр $V_{\max}$ регистрируется позже в группе CME2 – MC (медиана = 9 ч, IQR = 3–21 ч), чем в остальных группах событий, в силу существенно большего значения верхнего квартиля распределения. Таким образом, если сравнивать волоконные выбросы с MC и без него, то более быстрыми оказываются события, в которых есть MC, что частично можно объяснить тем, что магнитные облака достигают орбиты Земли, если их источник расположен в центральной зоне солнечного диска [например, Pappaioanou et al., 2020]. Если же Земля не попадает в MC, это может означать, что тело магнитного облака прошло в стороне от Земли, а периферийная часть выброса, задевшая Землю, имеет меньшие скорости. Немного большую величину медианы $TV_{\max}$ в группе CME1 + MC по отношению к группе CME1 – MC частично можно объяснить тем, что довольно часто максимальные значения скорости наблюдаются именно внутри MC [Абунина и др., 2021], а в событиях без MC — в начале события (в области взаимодействия или на ударной волне). Анизотропия КЛ проходит свой максимум существенно раньше

при наличии MC, чем при его отсутствии, как для вспыхивающих, так и для волоконных событий (разность медиан 5 ч). Максимум геомагнитного индекса для обоих типов событий, наоборот, достигается существенно позже при наличии MC в теле выброса (разность медиан 4 ч). Максимальные значения анизотропии КЛ и геомагнитного индекса наблюдаются раньше во вспыхивающих событиях, чем в волоконных, независимо от наличия или отсутствия MC в теле выброса у Земли (разность медиан 4 ч).

На рисунках 5–8 показано поведение основных параметров СВ, ММП, КЛ и геомагнитной активности для ФП, связанных с выбросами из АО или с волоконными выбросами вне АО, когда ICME содержит или не содержит MC. На верхней панели приведены почасовые значения скорости СВ (светло-серая кривая, правая шкала) и индукции ММП (темно-серая кривая, левая шкала). На средней панели показано поведение вариации плотности КЛ (A_0) и экваториальной составляющей векторной анизотропии КЛ ($A_{\text{ху}}$). На нижней панели представлены данные геомагнитной активности (Kp - и Dst -индексы). Закрашенная область — время регистрации магнитного облака. Вертикальной линией обозначено начало события (с SSC — светло-серой, без SSC — темно-серой). Стрелками на рисунках обозначены исследуемые в данной работе временные параметры $TV_{\max}$, $TB_{\max}$, $TD_{\min}$, $T_{\min}$, $TA_{\text{хуmax}}$, TD_{stmin} .

На рисунке 5 представлен пример ФП из группы событий CME1 + MC. 16 июля 2017 г. в 05:59 UT на Земле была зарегистрирована ударная

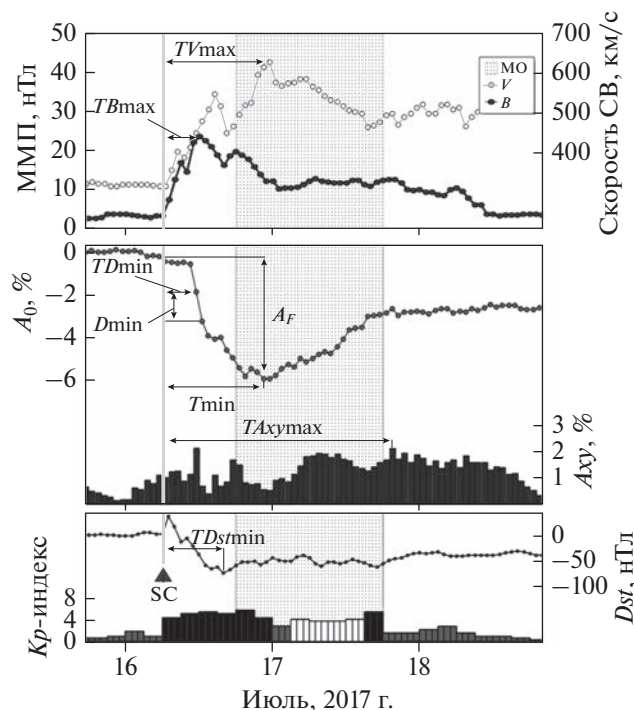


Рис. 5. Пример ФП 16 июля 2017 г. из группы CME1 + MC.

волна, связанная с приходом межпланетного возмущения. Источником этого события был корональный выброс массы типа гало с начальной скоростью 1200 км/с (по данным коронографа SOHO/LASCO) от вспышки M2.4 (S06W29) 14 июля 2017 г. в 01:07 UT. В результате воздействия данного межпланетного возмущения было зарегистрировано ФП с амплитудой $A_F = 5.8\%$ и максимальным значением экваториальной анизотропии КЛ $A_{ху\max} = 2.17\%$. Скорость СВ достигала значения $V_{\max} = 625$ км/с, а модуль ММП — значения $B_{\max} = 23.7$ нТл. Геомагнитная активность достигла уровня умеренной магнитной бури ($Kp_{\max} = 6$, $Dst_{\min} = -72$ нТл). Во время этого события MC проходило мимо Земли в течение 24 ч с 18:00 UT 16.07.2017 г.

На рисунке 6 представлен пример ФП из группы CME1 — MC. Форбуш-понижение 25 октября 2001 г. в 08:50 UT было зарегистрировано вследствие воздействия на Землю межпланетного возмущения, связанного с корональным выбросом массы с ассоциированной солнечной вспышкой M6.7 (S21E18) 22.10.2001 г. в 14:27 UT. По данным коронографа SOHO/LASCO этот корональный выброс был типа гало и имел начальную скорость 1336 км/с. Однако у Земли максимальная скорость СВ составила $V_{\max} = 449$ км/с, а максимальная величина ММП $B_{\max} = 11.4$ нТл. Амплитуда ФП в данном событии была $A_F = 1.5\%$, а максимальное значение экваториальной ани-

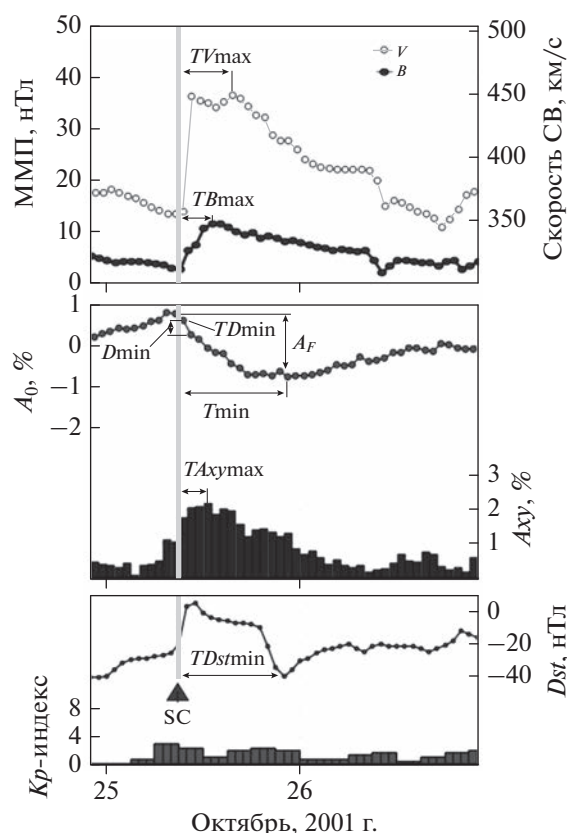


Рис. 6. Пример ФП 25 октября 2001 г. из группы CME1 — MC.

тропии КЛ $A_{ху\max} = 2.21\%$. Во время этого события геомагнитная активность была слабовозмущенной ($Kp_{\max} = 3$, $Dst_{\min} = -40$ нТл).

На рисунке 7 представлен пример ФП из группы CME2 + MC. 6 января 1998 г. в 14:16 UT было зарегистрировано ФП с амплитудой $A_F = 2\%$ и максимальным значением экваториальной анизотропии КЛ $A_{ху\max} = 1.49\%$. Источником этого события был корональный выброс массы типа гало, связанный с эрупцией волокна вечером 2 января на северо-западе солнечного диска. Максимальная скорость СВ во время этого события была $V_{\max} = 415$ км/с, а максимальная величина ММП $B_{\max} = 18.3$ нТл. 7 января была зарегистрирована умеренная магнитная буря ($Kp_{\max} = 6+$, $Dst_{\min} = -83$ нТл). Магнитное облако проходило мимо Земли в течение 28 ч с 02:00 UT 07.01.1998 г.

На рисунке 8 показан пример ФП из группы CME2 — MC. 15 ноября 2015 г. в 10:00 UT было зарегистрировано ФП, связанное с эрупцией волокна из центральной зоны солнечного диска днем 11.11.2015 г. Во время этого события, максимальная скорость СВ составила $V_{\max} = 417$ км/с, максимальная величина ММП $B_{\max} = 9.1$ нТл. Данное ФП имело амплитуду $A_F = 1.1\%$ и максимальное значение экваториальной анизотропии

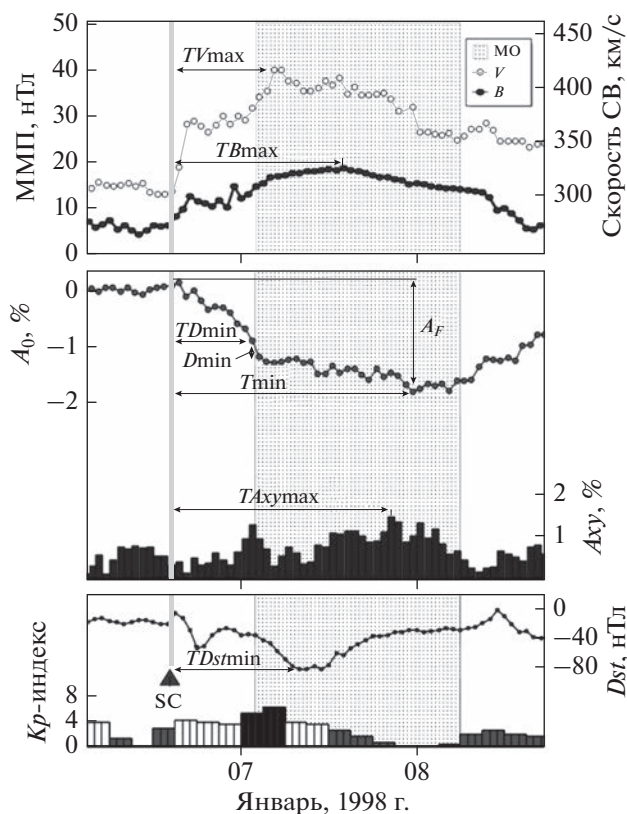


Рис. 7. Пример ФП 6 января 1998 г. из группы СМЕ2 + МС.

КЛ $A_{ху\max} = 1.98\%$. Геомагнитная активность не поднималась выше уровня $Kp_{\max} = 3+$, минимальное значение Dst -индекса составило -39 нТл.

Приведенные на рисунках 5–8 примеры иллюстрируют закономерности, полученные в результате анализа распределений параметров ФП для разных групп событий – свойства большого количества изучаемых объектов представляют доминирующие признаки индивидуального события. При сравнении распределений амплитуды ФП, связанных с солнечными источниками двух типов, при наличии или отсутствии МС у Земли было получено, что на модуляцию КЛ значительно влияет как наличие МС, так и тип солнечного источника. Медианные значения амплитуды ФП: $A_F = 4.8\%$ в группе СМЕ1 + МС, $A_F = 1.8\%$ в группе СМЕ2 + МС, $A_F = 1.3\%$ в группе СМЕ1 – МС и $A_F = 0.8\%$ в группе СМЕ2 – МС. В примерах на рисунках 5–8 наблюдается такая же закономерность: $A_F = 5.8\%$ в событии из группы СМЕ1 + МС (16 июля 2017 г.), $A_F = 2\%$ в событии из группы СМЕ2 + МС (6 января 1998 г.), $A_F = 1.5\%$ в событии из группы СМЕ1 – МС (25 октября 2001 г.) и $A_F = 1.1\%$ в событии из группы СМЕ2 – МС (15 ноября 2015 г.). Из сравнения статистических характеристик временных параметров следует, что ме-

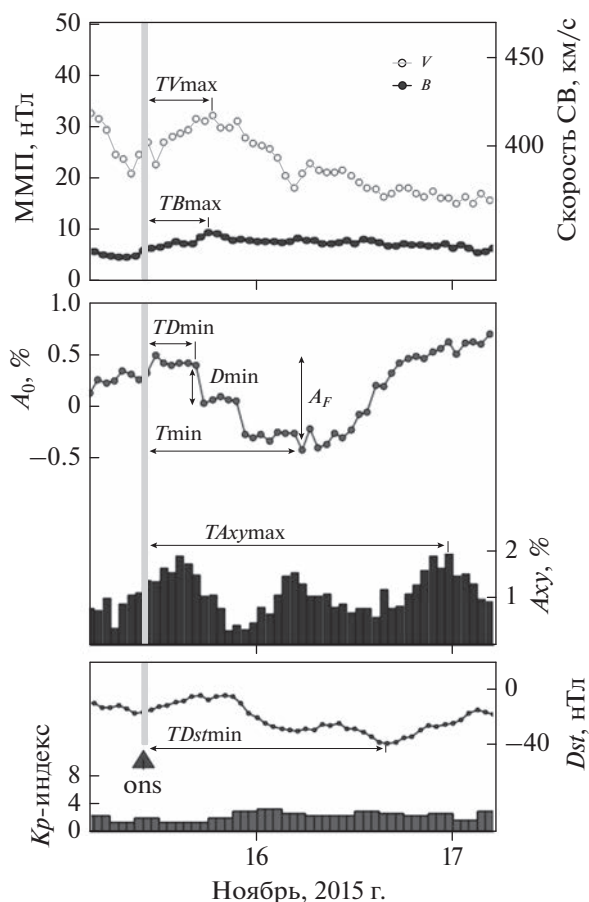


Рис. 8. Пример ФП 15 ноября 2015 г. из группы СМЕ2 – МС.

дианное значение времени максимума ММП в группе СМЕ1 + МС (7 ч) регистрируется значительно раньше, чем в группе СМЕ2 + МС (16 ч). Похожее поведение параметров мы видим на рис. 5 в событии из группы СМЕ1 + МС (16 июля 2017 г.), где $TB_{\max} = 7$ ч, и на рис. 7 в событии из группы СМЕ2 + МС (6 января 1998 г.), где $TB_{\max} = 24$ ч. При сравнении параметров $T_{\min}$ и $TD_{\min}$ в ФП с двумя разными типами солнечных источников, когда ICME содержит МС, видно, что медианы обоих параметров существенно меньше в группе СМЕ1 + МС ($T_{\min} = 16$ ч и $TD_{\min} = 4$ ч), чем в группе СМЕ2 + МС (соответственно, 19 ч и 10 ч). Такая же тенденция прослеживается и в примерах ФП из разных групп событий на рисунках 5 и 7: $T_{\min} = 16$ ч, $TD_{\min} = 6$ ч в событии из группы СМЕ1 + МС (16 июля 2017 г.) и $T_{\min} = 32$ ч, $TD_{\min} = 11$ ч в событии из группы СМЕ2 + МС (6 января 1998 г.).

4. ВЫВОДЫ

В данной работе для анализа развития ФП, связанных с разными типами солнечных источ-

ников, сравнивались распределения временных параметров: (1) в группах событий, связанных с выбросами из АО, сопровождающимися солнечными вспышками и с волоконными выбросами вне АО; (2) в выборках из этих групп, характеризующихся близкими значениями параметров солнечного ветра; (3) в выборках из этих групп, относящихся к максимумам солнечных циклов 23–24 и к минимуму между циклами; (4) в выборках из этих групп, отличающихся наличием или отсутствием МС в теле выброса у орбиты Земли. В качестве временных параметров использовались интервалы времени от начала события до максимумов вариации плотности КЛ (фаза спада, $T_{\min}$), часового уменьшения плотности КЛ ($TD_{\min}$), экваториальной анизотропии КЛ ($TA_{\max}$), индукции ММП ($TV_{\max}$), скорости СВ ($TV_{\max}$) и до минимума Dst -индекса ($TD_{\min}$). Получены новые результаты, которые показали следующее.

1. Значения параметров временного развития, как правило, меньше для ФП, связанных с СМЕ из АО, чем для ФП, связанных с волоконными выбросами вне АО.

2. При близких значениях параметров солнечного ветра все временные параметры (кроме фазы спада) остаются меньше для вспышечных событий.

3. Регистрация параметров $D_{\min}$, $B_{\max}$ и $V_{\max}$ приходится во вспышечных событиях на начало фазы спада, а в волоконных — на вторую половину этой фазы.

4. Разница между временными параметрами для двух типов ФП заметнее, если ICME содержит МС у Земли (за исключением параметра $TV_{\max}$).

5. Длительность фазы спада для ФП двух типов одинакова, если ICME не содержит МС около Земли; больше для волоконных событий при наличии МС.

6. Для вспышечных событий распределение параметра $TD_{\min}$ более компактное и характеризуется меньшими значениями при наличии МС в теле выброса.

7. Наибольшая разность между временными параметрами в двух типах событий наблюдается для межпланетного магнитного поля (кроме максимума цикла 23).

8. Фаза спада ФП обоих типов короче в максимумах циклов 23 и 24, чем в минимуме между циклами.

9. В максимуме цикла 23 фазы спада для двух типов ФП одинаковы; в максимуме цикла 24 и в минимуме между циклами фаза спада длиннее для волоконных событий.

10. Разница между временным развитием спорадических ФП двух типов, в целом, слабее в максимуме цикла 24, чем в максимуме цикла 23.

Таким образом, статистические характеристики параметров временного развития существенно различаются для ФП, связанных с выбросами из АО, которые сопровождаются солнечными вспышками, и с волоконными выбросами вне АО. Эти различия особенно заметны, если ICME содержит МС у орбиты Земли. Временные параметры в двух группах событий ведут себя по-разному в максимумах циклов 23 и 24 и в минимуме между циклами. Полученные результаты могут быть использованы при исследовании и сравнении ФП разных типов, при идентификации солнечных источников в сложных случаях, а также при решении задач прогнозирования.

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 аэрономия. Т. 52. № 3. С. 313–320. 2012.
- Абунина М.А., Абунин А.А., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Асипенко 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.
- 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 аэрономия. Т. 61. № 5. С. 572–582. 2021.
- 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.Г., 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.
- Гуцина Р.Т., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Обридо В.Н., Паорис Е., Шельтинг Б.Д. Модуляция космических лучей на фазе роста солнечной активности 24-го цикла // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 54. № 4. С. 470–476. 2014.

- 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 аэрономия. Т. 58. № 2. С. 163–176. 2018а.
- Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Долгопериодные изменения количества и величины Форбуш-эффектов // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 5. С. 638–647. 2018б.
- Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Рекуррентные и спорадические Форбуш-понижения в 23-ем и 24-ом солнечных циклах // Солнечно-земная физика. Т. 5. № 1. С. 39–47. 2019.
- 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 аэрономия. Т. 62. № 2. С. 155–170. 2022а.
- Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Шлык Н.С., Абунин А.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Сходство и различие Форбуш-понижений, связанных с потоками из корональных дыр, волоконными выбросами и выбросами из активных областей // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 62. № 3. С. 283–301. 2022б.
- Aslam O.P.M., Badruddin B. Study of cosmic-ray modulation during the recent unusual minimum and mini-maximum of solar cycle 24 // Solar Phys. V. 290. № 8. P. 2333–2353. 2015.
- Badruddin B., Yadav R.S., Yadav N.R. Influence of Magnetic Clouds on Cosmic-Ray Intensity Variation // Solar Phys. V. 105. № 5. P. 413–428. 1986.
- Badruddin B., Kumar A. Study of the cosmic-ray modulation during the passage of ICMs and CIRs // Solar Phys. V. 291. № 2. P. 559–580. 2016.
- 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. et al. Coronal mass ejections and non-recurrent Forbush decreases // Solar Phys. V. 289. N 10. P. 3949–3960. 2014.
- Belov A., Abunin A., Abunina M., Eroshenko E., Olenewa 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.
- Cane H.V. CMEs and Forbush decreases // Space Sci. Rev. V. 93. № 1/2. P. 55–77. 2000.
- 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.
- 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. № 1. P. 175–199. 2013.
- Dorman L. I. Cosmic ray variation and space research. M.: AN USSR. 1027 p. 1963.
- Dumbović M., Vrsnak B., Calogović J., Zupan R. Cosmic ray modulation by different types of solar wind disturbances // Astron. Astrophys. V. 538. № A28. 2012.
- 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., 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. Berlin Heidelberg: Springer. P. 289–307. 2010a.
- 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. № 2. P. 1111–1126. 2010b.
- Gopalswamy N., Akiyama S., Yashiro S., Michalek G., Xie H., Makelea P. Effect of the weakened heliosphere in solar cycle 24 on the properties of coronal mass Ejections // J. Phys.: Conf. Ser. V. 1620. № 1. Article id 012005. 2020.
- 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. et al. Forbush decreases: origin and development in the interplanetary space // Nuovo Cimento C. V. 2C. P. 1–52. 1979.
- 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.
- Lingri D., Mavromichalaki H., Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Abunin A., Abunina M. Solar activity parameters and associated Forbush decreases during the minimum between cycles 23 and 24 and the ascending phase of cycle 24 // Solar Phys. V. 291. № 3. P. 1025–1041. 2016a.
- Lingri D., Mavromichalaki H., Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Abunin A., Abunina M. Forbush decreases during the DeepMin and MiniMax of solar cycle 24 / Proc. 25th ECRS. Tourin, Italy, 2016. eConf C16-09-04.3. 2016b.
- 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., 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.
- Lockwood J.A., Webber W.R., Debrunner H. J. Forbush decreases and interplanetary magnetic field disturbances: Association with magnetic clouds // Geophys. Res. V. 96. Is. 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*. 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.
- Maričić D., Vrsnak B., Veronig A.M., Dumbović M., Sterc F., Rosa D., Karlica M., Hrzina D., Romstajn I. Sun-to-Earth observations and characteristics of isolated and Earth-impacting coronal mass ejections during 2008–2014 // *Solar Phys.* V. 295. № 7. Article id 91. 2020.
- Maričić D., Sterc F., Dumbović M., Rosa D., Hrzina D., Romstajn I. Isolated Earth-impacting interplanetary coronal mass ejections and corresponding galactic cosmic ray flux variations // XVIIth Hvar Astrophysical Colloquium “The Sun and Heliosphere”. 20–24 September 2021.
- 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.
- Matzka J., Stolle C., Yamazaki Y., Bronkalla O., Morschhauser A. The geomagnetic Kp index and derived indices of geomagnetic activity // *Space Weather*. V. 19. № 5. e2020SW002641. 2021.
- 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.
- Papaioannou A., Belov A., Abunina M., Eroshenko E., Abunin A., Anastasiadis A., Patsourakos S., Mavromichalaki H. Interplanetary coronal mass ejections as the driver of non-recurrent Forbush decreases // *Astrophys. J.* V. 890. № 2. Article id. 101. 2020.
- Paouris E., Mavromichalaki H., Belov A., Gushchina R., Yanke V. Galactic cosmic ray modulation and the last solar minimum // *Solar Phys.* V. 280. № 1. P. 255–271. 2012.
- 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. 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.G., Cane H.V. Galactic cosmic ray intensity response to Interplanetary Coronal Mass Ejections/Magnetic Clouds in 1995–2009 // *Solar Phys.* V. 270. № 9. P. 609–627. 2011a.
- Richardson I., Cane H. Geoeffectiveness (Dst and Kp) of interplanetary coronal mass ejections during 1995–2009 and implications for storm forecasting // *Space Weather*. V. 9. S07005. 2011b.
- Singh Y.P., Badruddin B. Effects of interplanetary magnetic clouds, interaction regions, and high-speed streams on the transient modulation of galactic cosmic rays // *J. Geophys. Res.* V. 112. № 2. CiteID A02101. 2007.
- Zhang G., Burlaga L.F. Magnetic clouds, geomagnetic disturbances, and cosmic ray decreases // *J. Geophys. Res.* V. 93. № A4. P. 2511–2518. 1988.