

УДК 524.1.352;523.62-726;550.385.4

ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЯ И ГЕОМАГНИТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ: 1. СОБЫТИЯ, СВЯЗАННЫЕ С РАЗНЫМИ ТИПАМИ СОЛНЕЧНЫХ И МЕЖПЛАНЕТНЫХ ИСТОЧНИКОВ

© 2023 г. А. А. Мелкумян¹, *, А. В. Белов¹, Н. С. Шлык¹,
М. А. Абунина¹, **, 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: abunina@izmiran.ru

Поступила в редакцию 18.05.2023 г.

После доработки 22.06.2023 г.

Принята к публикации 03.08.2023 г.

В работе исследуются статистические связи между геомагнитными индексами и характеристиками космических лучей и межпланетных возмущений для Форбуш-понижений, связанных с: а) корональными выбросами массы из активных областей, сопровождавшимися солнечными вспышками; б) волоконными выбросами вне активных областей; в) высокоскоростными потоками из корональных дыр; г) несколькими источниками. Для спорадических Форбуш-понижений, с использованием статистических методов, сравнивается зависимость геомагнитных индексов от параметров космических лучей и солнечного ветра при наличии или отсутствии магнитного облака. Полученные результаты показали: а) самая высокая геоэффективность характерна для межпланетных возмущений, связанных с выбросами солнечного вещества из активных областей, при наличии магнитного облака; самая низкая — для рекуррентных возмущений; б) спорадические и рекуррентные события отличаются не только величиной геомагнитных индексов и южной компоненты магнитного поля, но и характером связи между ними; в) геоэффективность транзитных возмущений солнечного ветра зависит от наличия или отсутствия магнитного облака сильнее, чем от типа солнечного источника; г) для межпланетных возмущений, связанных с волоконными выбросами вне активных областей, при наличии магнитного облака геоэффективность зависит только от южной компоненты магнитного поля, для остальных типов возмущений — и от других параметров солнечного ветра.

DOI: 10.31857/S0016794023600503, EDN: PWBRCG

1. ВВЕДЕНИЕ

Форбуш-понижением (ФП) называют изменение плотности галактических космических лучей (КЛ) в крупномасштабных возмущениях солнечного ветра (СВ), проявляющееся в относительно быстром понижении интенсивности КЛ, за которым следует более медленное (в масштабе нескольких дней) восстановление [Fogbush, 1937; Lockwood, 1971; Iucci et al., 1979]. Убывание плотности галактических КЛ во время ФП часто сопровождается повышенными значениями анизотропии КЛ [Belov, 2009]. ФП делятся на: а) спорадические [Cane, 2000], вызванные межпланетными возмущениями (*Interplanetary Coronal Mass Ejections* — ICMEs), связанными с корональными выбросами массы (*Coronal Mass Ejections* — CMEs); б) рекуррентные [Richardson, 2004], связанные с областями взаимодействия (*Corotating Interaction Regions* — CIRs) высокоскоростных потоков из корональных дыр (*Coronal Holes* — CHs) со спокой-

ным СВ. ФП являются частью комплекса явлений, характеризующих солнечные и гелиосферные возмущения, и поэтому естественно ожидать наличие зависимости (по крайней мере, статистической) между параметрами ФП и других явлений — от солнечных вспышек до геомагнитных бурь. Известно, что основным источником магнитосферных возмущений является отрицательная (южная) компонента (B_z) межпланетного магнитного поля (ММП), так как в этом случае магнитосфера становится открытой, энергия СВ может поступать в магнитосферу и приводить к магнитным бурям. Среди межпланетных возмущений, включающих длительную значительную по величине южную B_z -компоненту, рассматриваются, прежде всего, такие структуры, как ICMEs, геоэффективность которых строго коррелирует с величиной B_z [Richardson and Cane, 2011] (под геоэффективностью понимается вероятность возникновения магнитной бури или эффективность процесса генерации бури). Кроме ICMEs, источ-

никами магнитных бурь являются также CIRs, которые имеют меньшую геоэффективность и вызывают менее интенсивные магнитные бури [Alves et al., 2006], а также комплексные структуры, образующиеся в результате взаимодействия потоков солнечного ветра из двух или более источников [Родькин и др., 2020; Шлык и др., 2021]. Для CMEs из активных областей (АО), сопровождавшихся солнечными вспышками, статистический анализ зависимости Dst -индекса от свойств выброса (скорость, угловая ширина, взаимодействие с другими CMEs, расположение источника, класс вспышки) проводился в Dumbović et al. [2015]. Хотя продолжительная (>2 ч) и значительная по величине (<-5 нТл) отрицательная B_z -компонента является основным источником магнитосферных возмущений [Gopalswamy, 2008], генерация магнитных бурь характеризуется определенным поведением и других параметров СВ [Ермолаев и Ермолаев, 2009].

Связь между характеристиками СВ и геомагнитной активности (ГА) для разных типов межпланетных возмущений исследовалась во многих работах. В Alves et al. [2006] исследовалась геоэффективность CIRs с 1964 по 2003 гг. с определением для каждого CIR-события интенсивности геомагнитной бури: сильная ($|Dst| > 100$ нТл), умеренная (50 нТл $< |Dst| < 100$ нТл), слабая (30 нТл $< |Dst| < 50$ нТл). Результаты показали, что 33% CIRs, наблюдаемых около Земли, являются геоэффективными ($|Dst| > 50$ нТл) и только 3% вызывают сильные бури. В работе также сравнивались распределения и корреляции максимальных значений скорости солнечного ветра (V_{max}) и индукции магнитного поля (B_{max}), минимальных значений отрицательной B_z -компоненты (B_{zmin}) и Dst -индекса ($Dstmin$) для CIRs и магнитных облаков (*Magnetic Clouds* – MCs). Было получено, что хотя распределения параметров в группах CIR и MC похожи, но медианы распределений меньше в группе CIR, чем в группе MC. Корреляция $Dstmin$ с B_{zmin} оказалась значительной, а с V_{max} и B_{max} – слабой. Yermolaev et al. [2012] для событий с 1976 по 2000 гг. сравнивали геоэффективность (вероятность генерации магнитных бурь) межпланетных возмущений разных типов: CIR, MC, *Ejecta* (тело ICME при отсутствии MC), *Sheath* (область сжатия перед ICME в случае как MC, так и *Ejecta*). Максимальная геоэффективность была получена для MC (≈ 0.6), затем для *Ejecta* с областью сжатия и CIR (≈ 0.2), минимальная – для *Ejecta* без области сжатия (≈ 0.08). Сравнение геоэффективности CIRs и ICMEs в 23-м солнечном цикле представлено в Verbanas et al. [2013], где исследовались связи между геомагнитными индексами (Dst , Ap , AE) и характеристиками межпланетных возмущений (V_{max} , B_{max}) методами линейной и степенной регрессии. Было показано, что влияние CIR и ICME на магнито-

сферу Земли отличается для разных широт, что выражается в развитии разных токовых систем в магнитосфере и ионосфере Земли. В случае ICME, для экваториальной токовой системы характерны линейные зависимости между геомагнитными индексами и характеристиками межпланетного возмущения, а для полярной токовой системы – нелинейные; для CIR обе токовые системы характеризуются нелинейными связями между параметрами. Дремухина и др. [2019] анализировали динамику геомагнитных индексов и параметров межпланетных возмущений в периоды магнитных бурь ($Dst < -50$ нТл), индуцированных разными межпланетными источниками (CIR, *Sheath*, MC, *Ejecta*), с 1997 по 2017 гг. В работе показано, что наиболее эффективная генерация магнитной бури, с самым крутым понижением Dst , наблюдается для *Sheath*-событий, а самый слабый отклик Dst -индекса характерен для *Ejecta*. Родькин и др. [2020] для 2010–2011 гг. исследовали геоэффективность одиночных ICME и комплексных возмущений, образованных в результате взаимодействия ICME с высокоскоростными потоками из CHs или с другими ICMEs. В работе показано, что комплексные возмущения чаще приводят к умеренным и сильным магнитным бурям, чем одиночные ICME; при этом, большая продолжительность существования структуры приводит к более длительному периоду повышенной геомагнитной активности.

Хотя ФП и геомагнитные бури могут быть вызваны одними и теми же возмущениями СВ, но в магнитных бурях ключевую роль играет отрицательная (южная) B_z -компонента ММП, а на величину ФП знак B_z -компоненты не влияет. Еще одно отличие: геомагнитные возмущения определяются локальными характеристиками СВ, обтекающего магнитосферу Земли, в то время как модуляция КЛ является результатом влияния всей крупномасштабной межпланетной неоднородности. Возмущение СВ, способное вызвать магнитную бурю, не может не повлиять на КЛ: можно считать, что каждой магнитной буре соответствует ФП, хотя иногда этот эффект по наблюдениям на Земле очень мал; в то же время, ФП без магнитной бури встречаются часто [Belov, 2009]. Связь параметров ФП (характеристик КЛ и межпланетных возмущений) и индексов ГА исследовалась во многих работах. Belov et al. [2001] исследовали статистическую зависимость амплитуды ФП (AF) и максимального в течение события значения Kp -индекса (Kp_{max}) с 1978 по 1996 гг. Было показано, что большинству магнитных бурь соответствуют относительно малые значения амплитуды ФП; во время слабых бурь ($Kp_{max} = 5$) вариации плотности КЛ небольшие ($AF < 1\%$), типичная большая амплитуда ФП ($AF \geq 5\%$) наблюдается только во время очень сильных бурь ($Kp_{max} \geq 8$). В Belov [2009] представлены средние значения AF

для разных уровней ГА с 1957 по 2006 гг. и указано на наличие связи между этими двумя параметрами. ФП малой величины (<1%) обычно соответствуют низким значениям Kp -индекса ($\leq 3+$), очень сильные магнитные бури и гигантские ФП сопровождают друг друга, однако, такая зависимость часто нарушается. Например, ФП (2002.11.17) с большой амплитудой ($AF = 7.4\%$) соответствует очень низкое значение $Kp_{max} = 4$, в то время как ФП (2002.11.20) с гораздо меньшей амплитудой ($AF = 0.8\%$) соответствует сильная магнитная буря ($Kp_{max} = 7-$). В Kane [2010] проводился совместный анализ сильных магнитных бурь и больших спорадических ФП с 1965 по 1994 гг. Результаты показали, что минимальные (в течение ФП) значения Dst -индекса и плотности КЛ наблюдаются в разное время, а корреляция между Dst_{min} и AF статистически незначима, что указывает на разные механизмы развития событий. В то же время, значения Dst_{min} обычно наблюдаются одновременно с Bz_{min} , хотя корреляция между этими двумя величинами слабая; при этом, корреляция Dst_{min} с суммой почасовых значений Bz (от начала ФП до Bz_{min}) существенно выше. Badruddin and Kumar [2015] сравнивали временные профили Dst -индекса, вариаций плотности КЛ, скорости СВ, индукции ММП, отрицательной Bz -компоненты в течение четырех выбранных месяцев с 2001 по 2006 гг.. Результаты показали, что: а) как ICME, так и CIR, могут не вызывать магнитные бури и Форбуш-понижения одновременно; б) *Sheath* и MC оказываются наиболее эффективными структурами при генерации как магнитных бурь, так и Форбуш-понижений; в) для ICME наиболее геоэффективным параметром является южная (отрицательная) компонента магнитного поля, для CIR – флуктуирующая северо-южная компонента; г) наиболее важным источником генерации Форбуш-понижений является усиленное турбулентное магнитное поле в *Sheath* или MC. Lingri et al. [2016] провели статистический анализ значений амплитуды ФП, параметров межпланетных возмущений и геомагнитных индексов с 2008 по 2013 гг. Вычислялись парные коэффициенты корреляции для параметров AF , Dst_{min} , V_{max} и начальной скорости CMEs (V). Полученные результаты показали: а) корреляция Dst_{min} с AF и V слабая, а с V_{max} – статистически незначимая; б) время регистрации Dst_{min} не совпадает со временем регистрации AF ; в) быстрые CMEs ($V > 400$ км/с) и большие Форбуш-понижения связаны с большими уменьшениями Dst -индекса; г) уменьшение Dst -индекса и плотности КЛ следуют одной и той же модели, хотя их величины не пропорциональны друг другу, что может быть результатом разных механизмов генерации ФП и геомагнитных бурь. Aslam and Badruddin [2017] сравнивали временные профили Dst -индекса, вариаций КЛ и параметров

межпланетных возмущений для транзитных событий в солнечном цикле 24. Во всех исследуемых событиях, падение плотности КЛ началось раньше, чем падение значений Dst -индекса, а восстановление Dst -индекса опережало восстановление плотности КЛ. Максимальная корреляция между профилями Dst -индекса и Bz -компоненты достигалась при сдвиге по времени от 1 до 3 часов. Корреляция Dst со скоростью СВ была максимальна в течение главной фазы геомагнитного шторма, а с индукцией ММП – на фазе восстановления. Шлык и др. [2021] для событий с 1995 по 2019 гг. исследовали свойства ФП, связанных с разными типами взаимодействующих межпланетных возмущений, и сравнивали их с изолированными событиями. Было показано, что средние значения $|Dst_{min}|$: а) для СН, следующих за ICME, немного больше, чем для изолированных СН; б) для ICME, за которой следует СН, меньше, чем для изолированных ICME; в) в случае двух взаимодействующих ICMEs, меньше для первого возмущения, чем для второго. Таким образом, первые события из взаимодействующей пары менее геоэффективны, а вторые события получают дополнительные “ресурсы”.

Цель настоящей работы – выяснить, как значения геомагнитных индексов соотносятся с характерными для ФП параметрами КЛ и межпланетных возмущений в группах событий, связанных с разными типами солнечных и межпланетных источников. Для исследования геомагнитных возмущений, происходящих одновременно с развитием ФП, были использованы события со значениями $Bz_{min} < -5$ нТл (Bz_{min} – минимальное в течение ФП значение отрицательной (южной) компоненты ММП). Большое количество используемых событий позволило применить статистические методы исследования данных. По типу солнечных источников из полного массива данных (группа FULL) выделялись четыре группы событий: а) группа CME1 – ФП, связанные с выбросами массы из АО, сопровождавшимися солнечными вспышками; б) группа CME2 – ФП, связанные с волоконными выбросами вне АО; в) группа СН – ФП, вызванные высокоскоростными потоками из корональных дыр; г) группа MIX – ФП, связанные с несколькими источниками. Исследовались также различия между спорадическими событиями при наличии (группы CME1 + MC и CME2 + MC) или отсутствии (группы CME1 – MC и CME2 – MC) магнитного облака.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В работе использовались данные с января 1997 по декабрь 2021 года из созданной и поддерживаемой в ИЗМИРАН базы данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений (*Forbush Effects*

and Interplanetary Disturbances – FEID) (<https://crst.izmiran.ru/aid/>). Период отбора событий начинается с 1997 г., потому что с этого года в базе данных FEID содержится непрерывная почасовая информация о параметрах солнечного ветра. В этой базе данных, каждому ФП соответствует набор параметров, характеризующих вариации КЛ [Белов и др., 2018; <http://spaceweather.izmiran.ru/dbs/vcr/vcr.txt>], СВ [King and Papitashvili, 2005; <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>], ГА [Matzka et al., 2021; <ftp://ftp.gfz-potsdam.de/pub/home/obs/kp-ap/wdc/>; <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index.html>] и солнечную активность (<http://www.swpc.noaa.gov/ftpdir/lists/xray>, <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/events/>). 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. За начало ФП принимается момент прихода ударной волны, в качестве индикатора которой используется внезапное начало магнитной бури (*Sudden Storm Commencement – SSC*) (https://isgi.unistra.fr/data_download.php). При отсутствии SSC, началом ФП считаются резкие изменения основных параметров межпланетной среды (скорости СВ и/или индукции ММП) и/или КЛ. Списки MCs 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., 2010; Kim et al., 2013; Richardson and Cane, 2010; (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/>)]. Процесс идентификации ФП с солнечными источниками описан в Мелкумян и др. [2018], Melkumyan et al. [2022].

Каждое событие в используемой базе данных характеризуется набором параметров, показывающих, как ведут себя характеристики КЛ, СВ и ГА во время развития ФП. В настоящей работе, для каждого ФП используются параметры: AF (амплитуда ФП или максимальная вариация плотности КЛ), A_{zmax} (максимальная в течение ФП экваториальная анизотропия КЛ), A_{zrange} (размах северо-южной анизотропии КЛ), B_{zmin} (минимальное в течение ФП отрицательное значение B_z -компоненты ММП), V_{max} и B_{max} (максимальные в течение ФП скорость СВ и индукция ММП), V_b и B_b (значения скорости СВ и индукции ММП за час до начала ФП). В качестве характеристик межпланетных возмущений используются также параметры $dB = B_{max} - B_b$ и $dV = V_{max} - V_b$ и параметр KT_{min} – минимальное

(в течение ФП) значение температурного индекса. Температурный индекс равен отношению наблюдаемой протонной температуры к ожидаемой температуре, вычисленной по значениям скорости СВ [Мелкумян и др., 2020; Melkumyan et al., 2021; http://spaceweather.izmiran.ru/dbs/kt/temp_index.txt]. Для характеристики ГА используются параметры: Dst_{min} (минимальное в течение события отрицательное значение Dst -индекса), Ap_{max} и Kp_{max} (максимальные в течение события значения индексов Ap и Kp). Солнечная активность характеризуется параметром SSN (*Solar Spot Numbers*), равным количеству солнечных пятен в день начала ФП (<https://www.sidc.be/silso/datafiles>). Для описания временного развития событий используется время от начала ФП до момента регистрации: а) минимальных значений плотности КЛ (T_{min} – время спада или длительность главной фазы ФП) и отрицательного Dst -индекса ($TDst_{min}$); б) максимальных значений скорости СВ (TV_{max}) и напряженности ММП (TB_{max}).

Большое количество исследуемых событий позволяет использовать статистические методы для анализа поведения всех параметров и связей между ними в разных группах ФП. Статистический подход к анализу данных предполагает, что свойства большого количества изучаемых объектов представляют доминирующие признаки индивидуального события. Для сравнения статистических свойств параметров и их взаимосвязей в разных группах событий строились круговые диаграммы, диаграммы рассеяния и диаграммы размаха; вычислялись квартили распределений, коэффициенты корреляции и стандартизированные коэффициенты множественной линейной регрессии. 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]: $r \leq 0.3$ – слабая, $0.3 < r \leq 0.5$ – умеренная, $0.5 < r \leq 0.7$ – значительная, $r > 0.7$ – сильная. Для исследования статистических связей между геомагнитными индексами и параметрами КЛ и межпланетных возмущений использовался также метод множественной регрессии, учитывающий взаимосвязи между всеми параметрами и дающий значительно более реальное представление о зависимости переменных, чем парные коэффициенты корреляции.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Форбуш-понижения, связанные с выбросами массы из активных областей, с волоконными выбросами за пределами активных областей, с CIRs или с несколькими источниками

Так как одним из основных факторов, влияющих на геомагнитную активность является суще-

Таблица 1. Медианы распределений Dst_{min} , A_{pmax} , SSN , параметров КЛ и СВ в разных группах событий ($B_z_{min} < -5$ нТл)

| | FULL | CME1 | CME2 | CH | MIX | CME1 + + MC | CME1 – – MC | CME2 + + MC | CME2 – – MC |
|-----------------|-------|------|------|-------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| N | 944 | 209 | 145 | 160 | 430 | 85 | 124 | 68 | 77 |
| Dst_{min} | –41 | –67 | –53 | –33.5 | –39 | –101 | –48 | –73.5 | –36 |
| A_{pmax} | 39 | 67 | 39 | 32 | 32 | 111 | 39 | 61.5 | 32 |
| AF | –1.1 | –2.3 | –1.2 | –1.0 | –1.0 | 4.8 | 1.5 | 1.8 | 1.0 |
| $A_{x_{max}}$ | 1.16 | 1.64 | 1.36 | 0.95 | 1.19 | 2.09 | 1.47 | 1.51 | 1.17 |
| $A_{z_{range}}$ | 0.97 | 1.38 | 1.06 | 0.86 | 1.09 | 1.78 | 1.18 | 1.09 | 0.95 |
| V_{max} | 543 | 544 | 443 | 595.5 | 554.5 | 625 | 502 | 453.5 | 425 |
| B_{max} | 12.7 | 16.6 | 13 | 11.4 | 12.1 | 22.1 | 13.4 | 15.85 | 11.2 |
| $B_{z_{min}}$ | –7.3 | –9.2 | –8.6 | –6.6 | 5.05 | –13.2 | –7.25 | –11.15 | –7.2 |
| KT_{min} | 0.50 | 0.25 | 0.30 | 0.62 | 0.56 | 0.13 | 0.41 | 0.19 | 0.49 |
| dV | 140.5 | 134 | 71 | 225 | 152 | 194 | 87 | 87.5 | 50 |
| dB | 6.5 | 9.8 | 7.8 | 6.75 | –7.1 | 15.3 | 6.55 | 11.1 | 5.4 |
| SSN | 65 | 112 | 77.5 | 15 | 62 | 105 | 115.5 | 61 | 95 |

ственная отрицательная B_z -компонента ММП, то в данной работе мы рассматривали только ФП, характеризующиеся значениями $B_{z_{min}} < -5$ нТл. В используемой базе данных с 1997 по 2021 гг. содержится $N = 1637$ событий, надежно привязанных к солнечным источникам разного типа. Значения южной компоненты ММП для этих событий меняются от -53.7 нТл до 9.0 нТл. После выбора по критерию $B_{z_{min}} < -5$ нТл (табл. 1), в группе FULL осталось 58% событий ($N = 944$), в группе CME1 – 68% ($N = 209$), CME2 – 66% ($N = 145$), CH – 49% ($N = 160$), MIX – 55% ($N = 430$); при этом, после выбора, медианы распределений большинства параметров во всех группах событий возросли (отрицательные значения уменьшились). Количество ФП, сопровождавшихся магнитными бурями ($K_{p_{max}} \geq 5$), составило: 508 событий в группе FULL, 149 событий в группе CME1, 79 событий в группе CME2, 70 событий в группе CH, 210 событий в группе MIX. На рис. 1 представлены круговые диаграммы K_p -индекса, показывающие относительное количество магнитных бурь разной интенсивности в группах CME1, CME2, CH, MIX. Как видно из рис. 1, в группе CME1 наблюдаются бури от слабых ($K_p = 5$; *minor*) до экстремальных ($K_p = 9$; *extreme*), в группе CME2 – от слабых до очень сильных ($K_p = 8$; *severe*), в группах CH и MIX – слабые, умеренные ($K_p = 6$; *moderate*) и сильные ($K_p = 7$; *strong*). Из рис. 2 (верхние панели) видно, что самая высокая геомагнитная активность характерна для межпланетных возмущений, связанных с CMEs из активных областей, менее высокая – для ICMEs, связанных с волоконными выбросами вне активных областей, и самая низкая – для смешанных событий и для CIRs (только

3% сильных бурь). Последний результат численно совпадает с оценкой геоэффективности CIRs, приведенной в Alves et al. [2006]. Полученные результаты характеризуют события в солнечных циклах 23–24 и подтверждают выводы, сделанные для солнечного цикла 23 в Gopalswamy [2008] (сравнение геоэффективности рекуррентных и спорадических событий) и Gopalswamy et al. [2010] (сравнение геоэффективности межпланетных возмущений, связанных с CMEs из АО и волоконными выбросами вне АО).

В табл. 1, при $B_{z_{min}} < -5$ нТл, для разных групп событий представлены медианы распределений: а) параметров геомагнитной и солнечной активности; б) параметров КЛ и межпланетных возмущений; в) параметров $dB = B_{max} - B_b$, $dV = V_{max} - V_b$, показывающих разницу между характеристиками возмущенного и спокойного СВ. На рис. 2 показаны диаграммы размаха параметров A_{pmax} , $|Dst_{min}|$, AF , $|B_{z_{min}}|$, B_{max} , V_{max} , dB , dV . Из соображений масштаба, в группе CME1 не показаны события: 2000.07.15 ($A_{pmax} = 400$), 2001.11.06 ($B_{max} = 62.0$ нТл, $B_{z_{min}} = -53.7$ нТл), 2003.10.29 ($AF = 28.0\%$, $V_{max} = 1800$ км/с), 2003.10.30 ($V_{max} = 1876$ км/с), 2003.11.20 ($Dst_{min} = -422$ нТл). Из рис. 2 и табл. 1 видно, что значения параметра A_{pmax} существенно больше в группе CME1 (медиана = 67), чем в группах CME2 (39), CH (32), MIX (32), причем в трех последних группах медианы распределений A_p -индекса практически совпадают. Для параметра $|Dst_{min}|$ медианные значения также наибольшие в группе CME1 (67 нТл), но медиана в группе CME2 (53 нТл) значимо больше, чем в группах CH (34 нТл) и MIX (39 нТл). Полученная разница в поведении A_p - и Dst -индексов, возможно, свя-

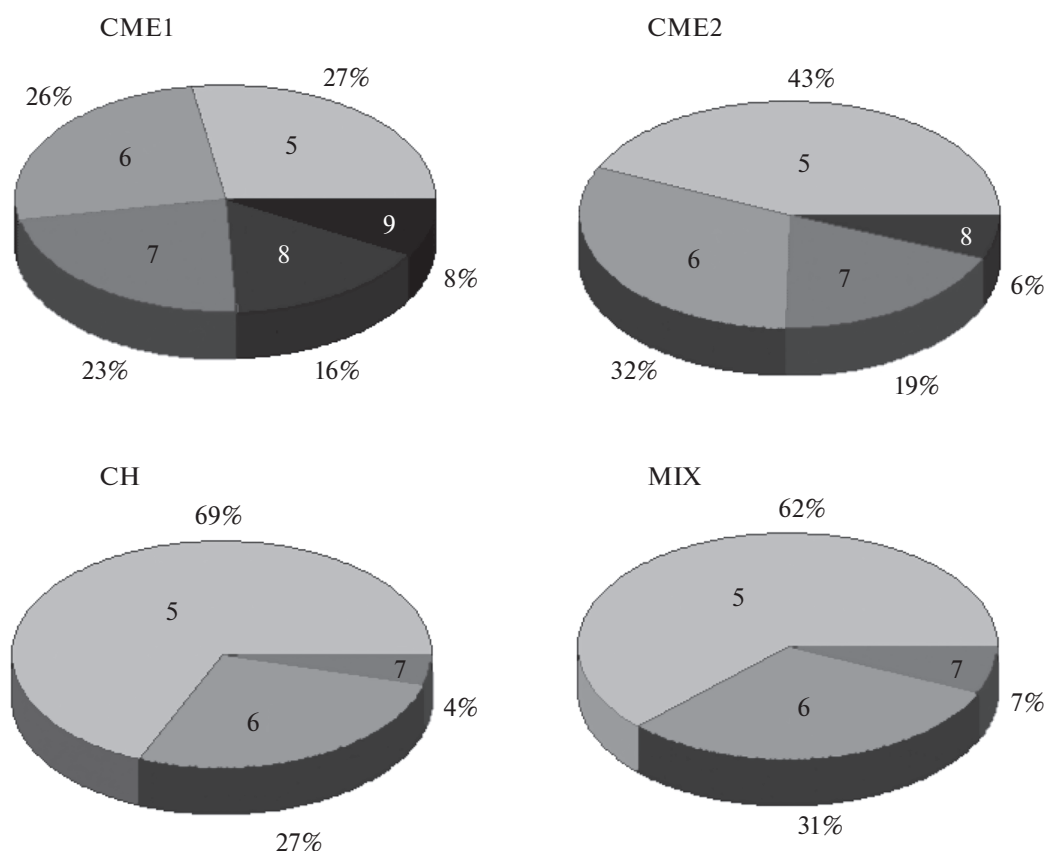


Рис. 1. Круговые диаграммы параметра K_{pmax} в группах SME1, SME2, CH, MIX ($B_z < -5$ нТл, $K_{pmax} \geq 5$ –).

зана с тем, что эти индексы чувствительны к разным токовым системам: A_p -индекс чувствителен к авроральному электроджету (магнитным суббурям) и кольцевому току (магнитным бурям), Dst -индекс – только к кольцевому току. В настоящей работе, в основном, используется Dst -индекс, который достаточно характеризует магнитную бурю. Из рис. 2 видно, что различие между распределениями в группах SME1 и SME2 существенно больше для параметра $Dstmin$, чем для параметра B_zmin . Значит, на ГА, кроме южной компоненты ММП, влияют и другие характеристики межпланетных возмущений; большая разница между распределениями в группах SME1 и SME2 наблюдается для амплитуды ФП и параметров V_{max} , I_{max} , dV . Что касается рекуррентных и смешанных событий, то распределения $Dstmin$ в этих группах практически повторяют распределения B_zmin (за исключением области малых значений, но это связано с выборкой по критерию $B_zmin < -5$ нТл). Медиана $|Dstmin|$ для рекуррентных и смешанных событий меньше, чем для спорадических событий обоих типов. Заметим, что, по данным Шлык и др. [2021], в случае смешанных событий, среднее значение $|Dstmin|$ также меньше в ICME взаимодействующей пары ICME–CH

(28.0 ± 1.9 нТл), чем в изолированных ICMEs (49.3 ± 3.9 нТл).

На рис. 3 (верхняя и средняя панель) представлены диаграммы рассеяния $Dstmin$ – B_zmin в группах SME1, SME2, CH, MIX. Из рисунка видно, что характер зависимости отличается для разных групп событий. Для спорадических событий (особенно в группе SME1), он ближе к линейному: $|Dstmin|$ возрастает с ростом $|B_zmin|$, выбросы из облака точек практически отсутствуют. В то же время, в группе CH значения $Dstmin$ слабо меняются с изменением B_zmin ; в группе MIX зависимость близка к линейной, но наблюдается много выбросов. Таким образом, спорадические и рекуррентные события отличаются не только величиной параметров $Dstmin$ и B_zmin , но и характером связи между ними. Сравнение характера зависимости Dst -индекса от параметров межпланетных возмущений, проведенное для спорадических и рекуррентных событий в Verbanas et al. [2013], также показало разницу в характере связи параметров в этих двух группах.

В табл. 2 представлены парные коэффициенты корреляции параметра $|Dstmin|$ с параметрами КЛ, межпланетных возмущений и солнечной активности в разных группах событий. Эти коэф-

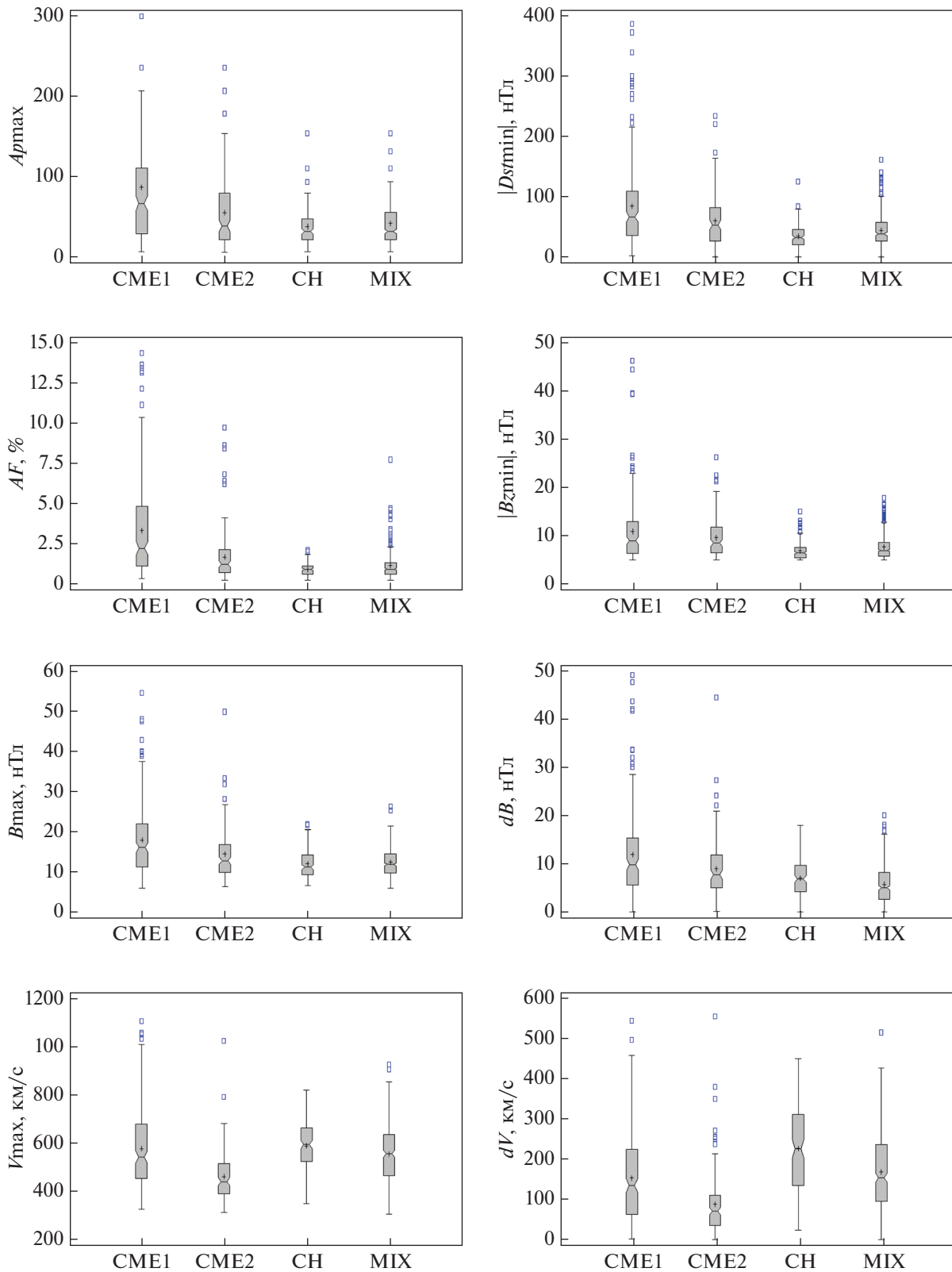


Рис. 2. Диаграммы размаха параметров A_{rmax} , $|Dstmin|$, AF , $|Bzmin|$, B_{max} , dB , V_{max} , dV в группах CME1, CME2, CH, MIX ($B_z < -5$ нТл). В группе CME1 не показаны события: 2000.07.15 ($A_{rmax} = 400$), 2001.11.06 ($B_{max} = 62.0$ нТл, $|Bzmin| = 53.7$ нТл), 2003.10.29 ($AF = 28.0\%$, $V_{max} = 1800$ км/с), 2003.10.30 ($V_{max} = 1876$ км/с), 2003.11.20 ($|Dstmin| = 422$ нТл).

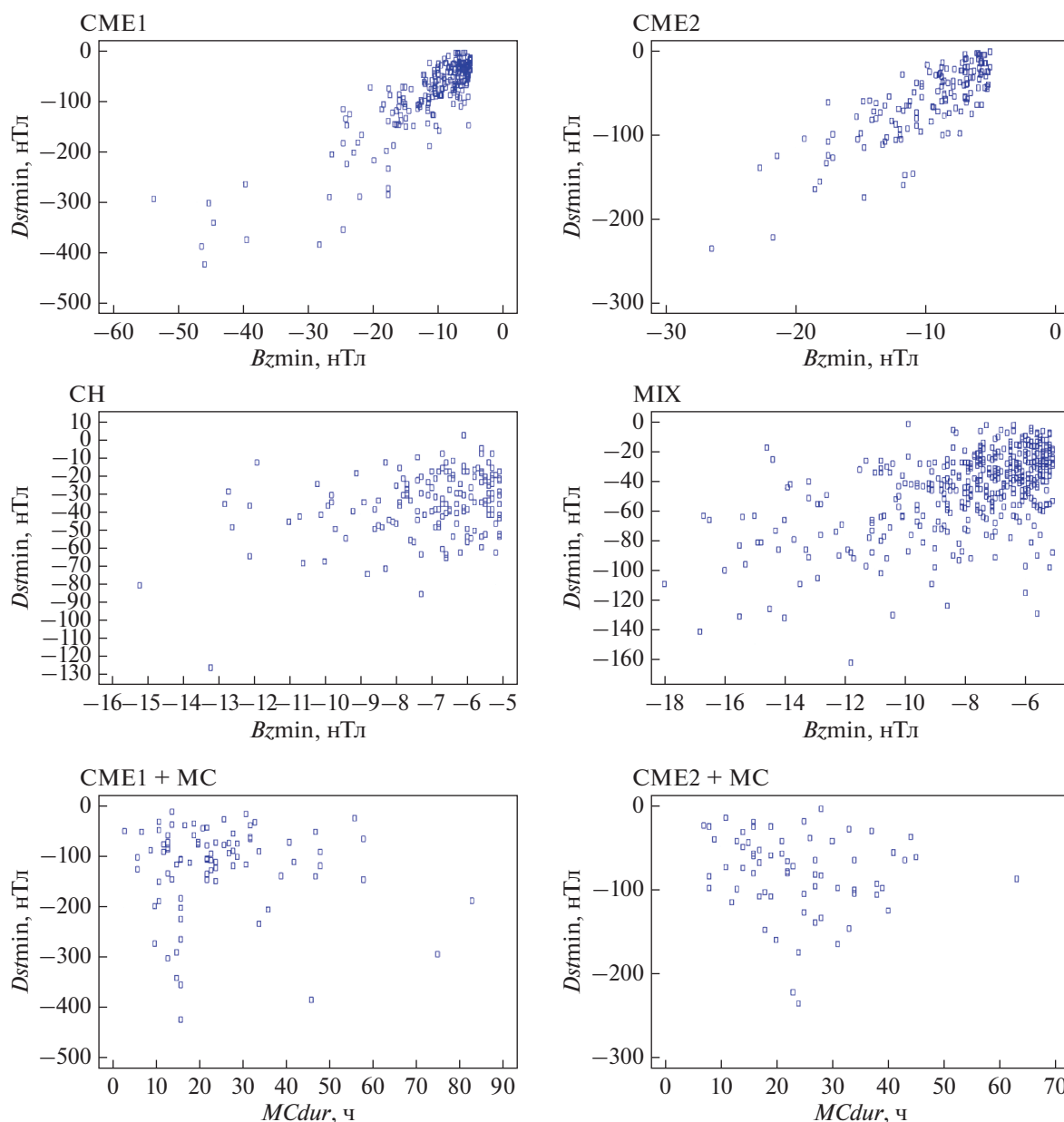


Рис. 3. Диаграммы рассеяния Dst_{min} – Bz_{min} в группах CME1, CME2, SH, MIX и Dst_{min} – $MCdur$ в группах CME1 + MC и CME2 + MC ($Bz_{min} < -5$ нТл).

коэффициенты вычислены без учета взаимосвязей между характеристиками, и зависимость Dst_{min} от какого-либо параметра может быть следствием связи этого параметра с другими величинами, например, с Bz_{min} . Полученные таким образом результаты могут быть очень полезны при расчетах, но при анализе физической природы зависимости ГА от межпланетных возмущений должны использоваться с осторожностью: с учетом всех статистических связей, зависимость Dst_{min} от некоторых параметров может оказаться более слабой или даже незначимой. Тем не менее, можно однозначно утверждать, что корреляционная связь

Dst_{min} и Bz_{min} : а) для спорадических событий (сильная) значительно больше, чем для смешанных (значительная) и рекуррентных (умеренная); б) в группах CME1 и CME2 отличается статистически незначимо ($z = 1.79$, $p = 0.07$); в) в группе MIX сильнее, чем в группе SH ($z = 2.41$, $p = 0.01$). Таким образом, для транзиентных возмущений СВ тип солнечного источника (выбросы массы из АО или волоконные выбросы вне АО) не влияет на зависимость Dst -индекса от величины южной компоненты ММП, самая сильная зависимость наблюдается для спорадических событий обоих типов, а самая слабая — для рекур-

Таблица 2. Коэффициенты корреляции $|Dstmin|$ с SSN , параметрами КЛ и СВ в разных группах событий ($Bz < -5$ нТл)

| | СМЕ1 | СМЕ2 | СН | МIX | СМЕ1 + + МС | СМЕ1 – – МС | СМЕ2 + + МС | СМЕ2 – – МС |
|----------------|-------|-------|------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <i>N</i> | 209 | 145 | 160 | 430 | 85 | 124 | 68 | 77 |
| <i>AF</i> | 0.62 | 0.58 | 0.36 | 0.28 | 0.68 | 0.35 | 0.54 | 0.46 |
| <i>Axymax</i> | 0.46 | 0.45 | – | 0.18 | 0.44 | 0.32 | 0.48 | 0.33 |
| <i>Azrange</i> | 0.49 | 0.39 | – | 0.30 | 0.50 | 0.30 | 0.37 | 0.37 |
| <i>Vmax</i> | 0.61 | 0.49 | 0.42 | 0.28 | 0.60 | 0.50 | 0.49 | 0.50 |
| <i>Bmax</i> | 0.80 | 0.72 | 0.42 | 0.38 | 0.78 | 0.75 | 0.67 | 0.65 |
| <i>Bzmin</i> | 0.86 | 0.80 | 0.35 | 0.53 | 0.83 | 0.85 | 0.75 | 0.75 |
| <i>KTmin</i> | –0.28 | –0.37 | – | – | –0.21 | –0.20 | –0.23 | –0.26 |
| <i>Vb</i> | 0.43 | 0.16 | 0.27 | 0.26 | 0.44 | 0.37 | – | 0.23 |
| <i>Bb</i> | 0.46 | 0.26 | 0.26 | 0.39 | 0.42 | 0.52 | 0.27 | 0.45 |
| <i>SSN</i> | 0.19 | – | 0.29 | 0.21 | 0.22 | 0.24 | 0.40 | – |

рентных событий. Что касается связи $Dstmin$ с остальными параметрами, то в группе СМЕ1 наблюдается значительная корреляция с $Vmax$, в группе СН – умеренная с $Bmax$, в группе MIX – умеренная с Bb . Корреляция геомагнитных индексов с параметрами КЛ и СВ для разных типов межпланетных возмущений исследовалась во многих работах и, хотя для спорадических событий обычно отмечалась более тесная связь, численные оценки коэффициентов корреляции различались от слабых [например, Kane, 2010; Lingri et al., 2016] до сильных [Badruddin and Kumar, 2015]. Более подробное обсуждение связей $Dstmin$ с параметрами КЛ и СВ для разных типов межпланетных возмущений будет представлено в разделе 3.3.

Для сравнения развития ФП и геомагнитных возмущений в разных группах событий использовались временные параметры: $TDstmin$, $Tmin$, $TBmax$ и $TVmax$ [Мелкумян и др., 2022; Melkumyan et al., 2023]. В табл. 3 представлены средние значения, медианы, межквартильные интервалы (*Interquartile Ranges* – IQRs) и 95%-ные границы распределений, а также коэффициенты корреляции $TDstmin$ с остальными параметрами в разных группах событий. Из табл. 3 видно, что: а) внутри каждой из групп СМЕ1 и СМЕ2 распределения $TDstmin$ и $Tmin$ практически совпадают; б) в группах СН и MIX минимум плотности КЛ достигается позже, чем экстремальное значение Dst -индекса; в) развитие ФП и геомагнитных возмущений происходит гораздо быстрее для спорадических событий (особенно, связанных с выбросами массы из АО), чем для рекуррентных; г) корреляция $TDstmin$ – $Tmin$ в группе СМЕ1 значимо превосходит корреляцию в группах СМЕ2 ($z = 1.97, p = 0.02$), СН ($z = 3.02, p = 0.001$), MIX ($z = 2.22, p = 0.01$); д) корреляция $TDstmin$ с $TBmax$ и $TVmax$ во всех группах событий положительная и

колеблется от слабой до значительной. Полученные результаты поддерживают вывод о том, что большая продолжительность существования межпланетной неоднородности приводит к более длительному периоду повышенной ГА [Родькин и др., 2020].

3.2 Форбуш-понижения, вызванные ICMEs, в которых наблюдалось или не наблюдалось магнитное облако

Для сравнения ГА транзитных событий, в которых наблюдается или не наблюдается магнитное облако около орбиты Земли, ФП, связанные с выбросами массы из АО или с волоконными выбросами вне АО, были разбиты на группы ($Bzmin < -5$ нТл): СМЕ1 + МС ($N = 85$ событий), СМЕ1 – МС ($N = 124$), СМЕ2 + МС ($N = 68$), СМЕ2 – МС ($N = 77$). При этом, количество ФП, сопровождавшихся магнитными бурями ($Kpmax \geq 5$ –), составило: 80 событий (94%) в группе СМЕ1 + МС; 69 событий (56%) в группе СМЕ1 – МС; 51 событие (78%) в группе СМЕ2 + МС; 28 событий (36%) в группе СМЕ2 – МС. Таким образом, в группе СМЕ1 + МС почти все межпланетные возмущения с $Bzmin < -5$ нТл вызвали геомагнитные бури, в то время как в группе СМЕ2 – МС количество магнитных бурь составило только около трети количества ФП. Несмотря на то, что геоэффективность межпланетных возмущений в группе СМЕ1 больше, чем в группе СМЕ2, вероятность появления магнитных бурь в группе СМЕ1 – МС меньше, чем в группе СМЕ2 + МС, то есть, наличие или отсутствие МС сильно влияет на ГА, чем тип солнечного источника. На рис. 4 представлены круговые диаграммы Kp -индекса, показывающие относительное количество магнитных бурь разной интенсивности в группах СМЕ1 + МС, СМЕ1 – МС, СМЕ2 +

Таблица 3. Статистические характеристики временных параметров и коэффициенты корреляции $TDstmin$ с $Tmin$, $TVmax$, $TBmax$ для разных групп событий ($Bz < -5$ нТл)

| Группа | N | Параметр | Среднее | Медиана | IQR | 95% | r |
|-----------|-----|-----------|----------------|---------|--------|-----|------|
| CME1 | 187 | $TDstmin$ | 16.6 ± 0.7 | 14 | 9–22 | 38 | 1.00 |
| | | $Tmin$ | 18.7 ± 0.7 | 15 | 8–23 | 36 | 0.54 |
| | | $TVmax$ | 10.2 ± 0.7 | 7 | 4–14 | 28 | 0.26 |
| | | $TBmax$ | 9.1 ± 0.6 | 6 | 3–12 | 28 | 0.27 |
| CME2 | 131 | $TDstmin$ | 19.1 ± 1.0 | 17 | 11–25 | 46 | 1.00 |
| | | $Tmin$ | 17.5 ± 0.8 | 17 | 10–23 | 33 | 0.36 |
| | | $TVmax$ | 11.9 ± 0.9 | 9 | 4–17 | 34 | – |
| | | $TBmax$ | 14.4 ± 0.9 | 12 | 7–20 | 33 | 0.45 |
| CH | 144 | $TDstmin$ | 23.1 ± 1.0 | 21 | 13–32 | 45 | 1.00 |
| | | $Tmin$ | 26.5 ± 1.1 | 26 | 16–40 | 46 | 0.26 |
| | | $TVmax$ | 33.4 ± 1.3 | 31 | 22–45 | 61 | 0.32 |
| | | $TBmax$ | 12.2 ± 0.8 | 9 | 5.5–17 | 29 | 0.46 |
| MIX | 337 | $TDstmin$ | 18.5 ± 0.6 | 16 | 10–25 | 41 | 1.00 |
| | | $Tmin$ | 22.2 ± 0.7 | 20 | 10–33 | 45 | 0.38 |
| | | $TVmax$ | 27.4 ± 0.8 | 25 | 17–37 | 56 | 0.33 |
| | | $TBmax$ | 12.1 ± 0.6 | 9 | 5–16 | 33 | 0.40 |
| CME1 + MC | 79 | $TDstmin$ | 16.9 ± 1.0 | 16 | 11–23 | 34 | 1.00 |
| | | $Tmin$ | 16.0 ± 0.8 | 16 | 9–22 | 30 | 0.48 |
| | | $TVmax$ | 8.8 ± 0.7 | 8 | 4–11 | 23 | – |
| | | $TBmax$ | 9.9 ± 0.8 | 7 | 5–13 | 26 | 0.27 |
| CME1 – MC | 108 | $TDstmin$ | 16.4 ± 1.0 | 13 | 9–21 | 38 | 1.00 |
| | | $Tmin$ | 17.2 ± 1.1 | 15 | 8–23 | 43 | 0.56 |
| | | $TVmax$ | 11.2 ± 1.0 | 6.5 | 3–15.5 | 35 | 0.34 |
| | | $TBmax$ | 8.5 ± 0.9 | 4 | 2–10.5 | 29 | 0.26 |
| CME2 + MC | 65 | $TDstmin$ | 21.2 ± 1.4 | 19 | 12–29 | 48 | 1.00 |
| | | $Tmin$ | 19.4 ± 1.1 | 18 | 12–25 | 33 | 0.37 |
| | | $TVmax$ | 10 ± 11.0 | 7 | 4–13 | 30 | – |
| | | $TBmax$ | 17.1 ± 1.1 | 16 | 10–23 | 33 | 0.50 |
| CME2 – MC | 66 | $TDstmin$ | 17.0 ± 1.3 | 14 | 10–22 | 43 | 1.00 |
| | | $Tmin$ | 15.6 ± 1.2 | 15 | 9–20 | 32 | 0.30 |
| | | $TVmax$ | 13.7 ± 1.5 | 9.5 | 4–21 | 40 | – |
| | | $TBmax$ | 11.7 ± 1.2 | 9 | 5–14 | 38 | 0.35 |

+ MC, CME2 – MC. Из рис. 4 следует, что событиям, связанным с CMEs из АО, при наличии MC соответствуют чаще умеренные ($Kpmax = 6$), сильные и очень сильные бури, реже встречаются бури слабые и экстремальные. При отсутствии MC, в этих событиях наблюдаются, в основном, слабые, умеренные и сильные бури, а очень сильные и экстремальные бури регистрируются крайне редко. Для ICMEs, связанных с волоконными выбросами вне активных областей, при наличии MC большая часть событий связана со слабыми и умеренными бурями, при отсутствии MC – со сла-

быми. Для этого типа событий, очень сильные бури встречаются намного реже, чем для событий, связанных с CMEs из активных областей, но при наличии MC вероятность такой бури все-таки больше. Таким образом, самая высокая геомагнитная активность наблюдается у межпланетных возмущений, связанных с CMEs из активных областей, при наличии MC, самая низкая – у ICMEs, связанных с волоконными выбросами вне активных областей, в отсутствие MC. Таким образом, на частоту появления бурь разной интенсивности влияет как тип солнечного источни-

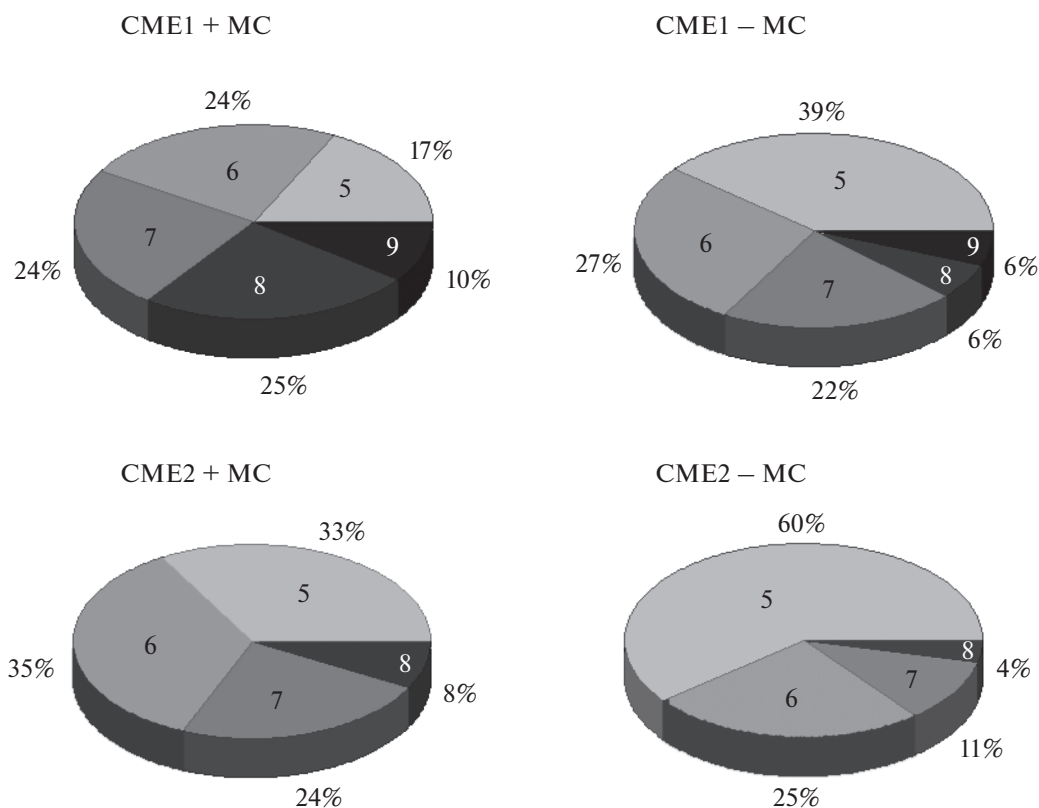


Рис. 4. Круговые диаграммы параметра Kp_{max} в группах SME1 + MC, SME1 - MC, SME2 + MC, SME2 - MC ($Bz_{min} < -5$ нТл, $Kp_{max} \geq 5$).

ка, так и тип межпланетной неоднородности, причем воздействие второго фактора более эффективно. Полученные результаты частично совпадают с результатами, полученными в Yermolaev et al. [2012], Дремухина и др. [2019] при сравнении межпланетных возмущений типа MC и Ejecta, но позволяют также оценить геомагнитную активность транзитных возмущений, связанных с разными типами солнечных источников.

В табл. 1 представлены медианы распределений параметров геомагнитной и солнечной активности, КЛ и СВ в группах SME1 + MC, SME1 - MC, SME2 + MC, SME2 - MC ($Bz_{min} < -5$ нТл). Из табл. 1 видно, что медианные значения параметра $|Dst_{min}|$ в группах с MC (SME1 + MC: 101 нТл, SME2 + MC 74 нТл) существенно больше, чем в группах без MC (SME1 - MC: 48 нТл, SME2 - MC: 36 нТл). Та же тенденция прослеживается для параметра $|Bz_{min}|$ (и для остальных параметров) как для событий, связанных с выбросами массы из АО (SME1 + MC: 13.2 нТл, SME1 - MC: 7.2 нТл), так и для событий, связанных с волокonnными выбросами вне АО (SME2 + MC: 11.2 нТл, SME2 - MC: 7.2 нТл). На рис. 5 показаны диаграммы размаха параметров Ap_{max} , $|Dst_{min}|$, AF , $|Bz_{min}|$, B_{max} , V_{max} , dV в группах SME1 + MC, SME1 - MC, SME2 +

+ MC, SME2 - MC ($Bz_{min} < -5$ нТл). Из соображений масштаба, не показаны события в группе SME1 + MC: 2000.07.15 ($Ap_{max} = 400$), 2001.11.06 ($B_{max} = 62.0$ нТл, $Bz_{min} = -53.7$ нТл), 2003.10.29 ($AF = 28.0\%$, $V_{max} = 1800$ км/с), 2003.10.30 ($V_{max} = 1876$ км/с), 2003.11.20 ($Dst_{min} = -422$ нТл). Из рис. 5 видно, что размах значений и ширина IQR больше в группах событий с MC для большинства параметров (кроме V_{max} и dV в событиях, связанных с волокonnными выбросами). Таким образом, можно сделать вывод, что для большинства параметров (в том числе для $|Dst_{min}|$ и $|Bz_{min}|$): а) медианы распределений больше в группах событий с MC у Земли; б) разница значений в группах с MC и без MC больше для событий, связанных с SMEs из активных областей; в) разница значений, вызванная наличием или отсутствием MC, намного больше, чем разница, вызванная различными типами солнечных источников.

В табл. 2 представлены значения парных коэффициентов корреляции параметра $|Dst_{min}|$ с параметрами КЛ и межпланетных возмущений в группах SME1 + MC, SME1 - MC, SME2 + MC, SME2 - MC. С учетом взаимосвязей между используемыми параметрами (раздел 3.3), можно уверенно говорить о сильной корреляции с Bz_{min}

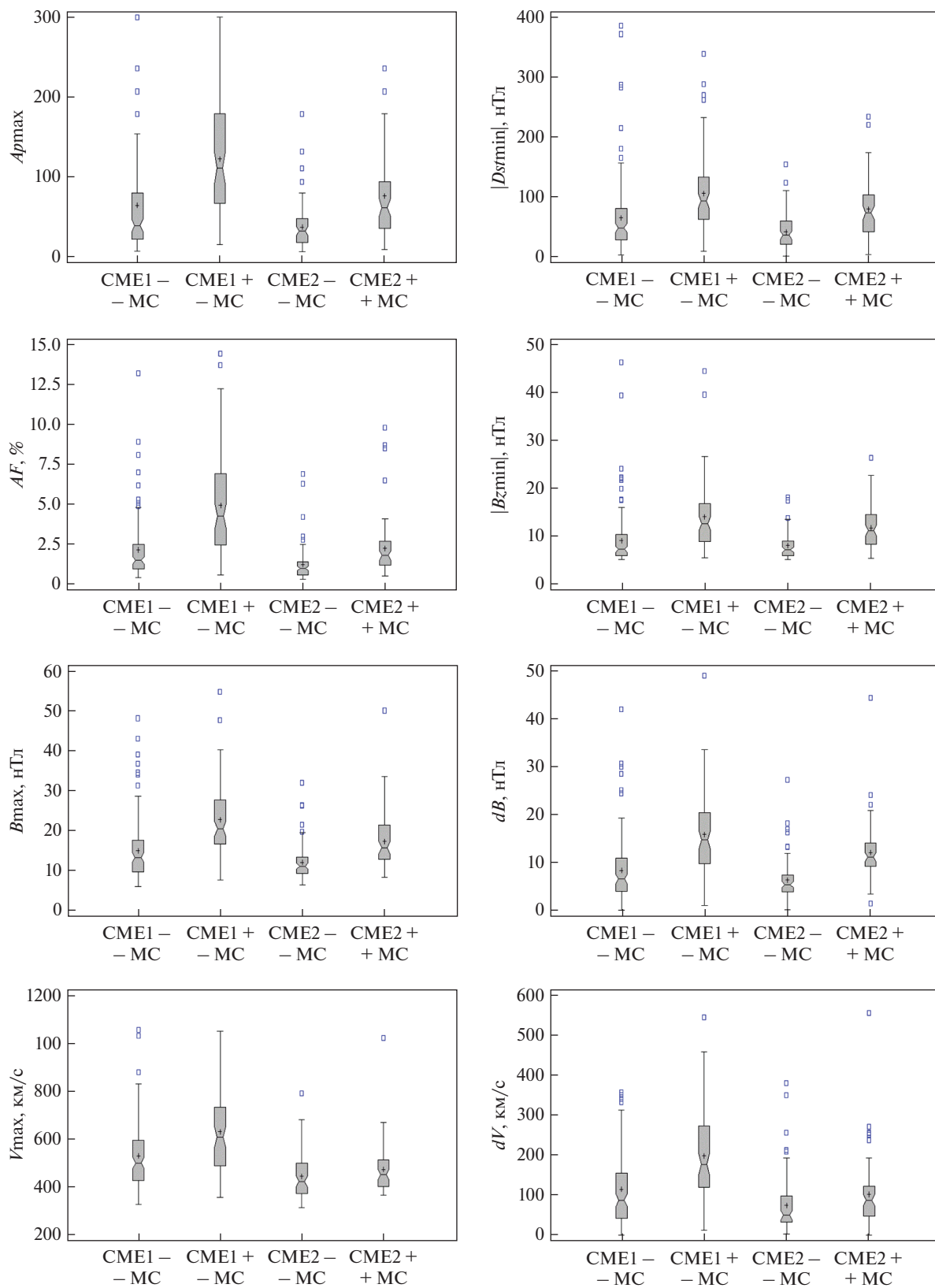


Рис. 5. Диаграммы размаха параметров A_{rmax} , $|Dstmin|$, AF , $|Bzmin|$, V_{max} , B_{max} , dV , dB в группах CME1 - MC, CME1 + MC, CME2 - MC, CME2 + MC ($B_z < -5$ нТл). В группе CME1 + MC не показаны события: 2000.07.15 ($A_{rmax} = 400$), 2001.11.06 ($B_{max} = 62.0$ нТл, $|Bzmin| = 53.7$ нТл), 2003.10.29 ($AF = 28.0\%$, $V_{max} = 1800$ км/с), 2003.10.30 ($V_{max} = 1876$ км/с), 2003.11.20 ($|Dstmin| = 422$ нТл).

(во всех группах событий), умеренной корреляции с V_{\max} (в группах без MC), V_b (в группе СМЕ1 + MC) и Bb (в группе СМЕ1 – MC). Коэффициенты корреляции $Dst_{\min} - Bz_{\min}$ для спорадических событий выше, чем коэффициенты, полученные для MCs в предыдущих работах [например, Alves et al., 2006], что может быть связано как с большим объемом выборок, так и с более удачным разделением событий на группы. Что касается коэффициентов корреляции $|Dst_{\min}|$ с остальными параметрами, то они в полной мере могут быть использованы для соответствующих расчетов, но полученная статистическая связь может быть следствием зависимости этих параметров от других величин, чаще всего от Bz_{\min} . Более подробно статистическая связь Dst_{\min} с параметрами КЛ и СВ обсуждается в разделе 3.3.

Кроме анализа связей Dst -индекса с амплитудными характеристиками межпланетных возмущений, мы исследовали также его зависимость от продолжительности MC (параметр $MCDur$). На рис. 3 (нижняя панель) представлены диаграммы рассеяния $Dst_{\min} - MCDur$ в группах событий СМЕ1 + MC и СМЕ2 + MC. Медианные значения параметра $MCDur$ в обеих группах событий равны 22 ч, но из рис. 3 видно, что характер связи $Dst_{\min} - MCDur$ значительно отличается в этих двух группах: облака точек имеют совершенно разную форму. При этом для событий, связанных с выбросами массы из АО, на плоскости явно выделяются два облака точек: при малых и больших значениях параметра $MCDur$ (пороговое значение ≈ 20 ч); характер зависимости в этих облаках существенно разный.

В табл. 3 представлены средние значения, медианы и IQRs параметров T_{\min} , $TDst_{\min}$, TB_{\max} и TV_{\max} , а также коэффициенты корреляции между $TDst_{\min}$ и остальными временными параметрами в группах СМЕ1 + MC, СМЕ1 – MC, СМЕ2 + MC, СМЕ2 – MC. Из табл. 3 видно, что распределения параметров $TDst_{\min}$ и T_{\min} внутри каждой группы событий практически совпадают, причем развитие геомагнитных возмущений и ФП в группе СМЕ2 + MC происходит медленнее, чем в остальных группах. Что касается интервалов времени между максимумом ГА и максимальными значениями параметров СВ, то: а) задержка Dst_{\min} относительно V_{\max} (7–8 ч) и B_{\max} (9 ч) в группах СМЕ1 + MC и СМЕ1 – MC почти совпадают; б) запаздывание Dst_{\min} относительно B_{\max} в группах СМЕ2 + MC и СМЕ2 – MC (3–5 ч) и относительно V_{\max} в группе СМЕ2 – MC (5 ч) примерно одинаково, а задержка относительно V_{\max} в группе СМЕ2 + MC существенно больше (12 ч). Такое отставание минимума Dst -индекса от максимальной скорости солнечного ветра связано с очень большим значением TV_{\max} (16 ч), которое частично можно объяснить тем, что в событиях с MC максимальные значения скорости до-

вольно часто наблюдаются именно внутри MC [Абунина и др., 2021], а в событиях без MC – в начале события (в области взаимодействия или на ударной волне).

3.3 Множественный регрессионный анализ для всех групп событий

Для сравнения статистических зависимостей между Dst -индексом и характеристиками КЛ и СВ использовался метод множественной регрессии: вычислялись стандартизированные коэффициенты регрессии (*Standardized Regression Coefficients* – SRCs) и коэффициент детерминации (R^2) для прогнозируемой переменной $|Dst_{\min}|$ и набора предикторов AF , $A_{\text{хутах}}$, Az_{range} , B_{\max} , V_{\max} , Bz_{\min} , Bb , V_b , KT_{\min} в разных группах событий (табл. 4). Значение SRC показывает долю дисперсии параметра Dst_{\min} , объясняемую данным предиктором, и оценивает силу влияния этого предиктора на прогнозируемую величину. Значение R^2 показывает долю дисперсии параметра Dst_{\min} , которую объясняют все используемые предикторы, и оценивает качество прогноза. Так, добавление в группу предикторов параметра SSN привело к существенному уменьшению R^2 (в группе FULL с 0.78 до 0.46), то есть к ухудшению прогноза. Из табл. 4 видно, что для спорадических событий, независимо от типа солнечного источника и наличия или отсутствия MC, значения R^2 (от 0.73 до 0.83) больше, чем для групп СН (0.42) и MIX (0.46). Таким образом, зависимость Dst -индекса от набора предикторов, а точнее сила этой зависимости и степень ее линейности, отличается для разных типов солнечных источников. При этом, результаты прогноза для групп спорадических событий характеризуются большой степенью надежности, а результаты для групп СН и MIX менее надежны. Не очень большие, хотя вполне достаточные для получения статистически значимых результатов, значения R^2 могут объясняться как сложностью и разнообразием влияния межпланетной среды, так и тем, что используемый набор предикторов не определяет полностью воздействие возмущений СВ на ГА. Результаты, представленные в табл. 4, показывают сильную ($SRC \approx 0.7$) зависимость $|Dst_{\min}|$ от $|Bz_{\min}|$ для всех групп спорадических событий и слабую ($SRC \approx 0.2$) зависимость $|Dst_{\min}|$ от V_{\max} для ICMEs, в которых отсутствует MC. Для смешанных событий, кроме $|Bz_{\min}|$ ($SRC = 0.47$) и V_{\max} (0.38), значения Dst_{\min} определяются также параметрами V_b (0.25) и Bb (0.17), характеризующими спокойный СВ. Для рекуррентных событий, зависимость $|Dst_{\min}|$ от $|Bz_{\min}|$ ($SRC = 0.21$) слабее, чем от B_{\max} (0.37) и V_b (0.36). Множественный регрессионный анализ показывает, что: а) для всех групп событий, кроме СМЕ2 + MC, значения Dst -индекса зависят не только от юж-

Таблица 4. Результаты множественной линейной регрессии для прогнозируемой переменной $|Dstmin|$ в разных группах событий ($Bz < -5$ нТл)

| | CME1 | CME2 | СН | MIX | CME1 + + MC | CME1 – – MC | CME2 + + MC | CME2 – – MC |
|--|------|------|-------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| N | 209 | 145 | 160 | 430 | 85 | 124 | 68 | 77 |
| R^2 | 0.83 | 0.77 | 0.42 | 0.46 | 0.83 | 0.82 | 0.73 | 0.75 |
| Стандартизированные коэффициенты регрессии | | | | | | | | |
| AF | – | 0.15 | 0.18 | 0.11 | – | – | – | – |
| Ax_{max} | – | – | –0.17 | – | – | – | – | – |
| Az_{range} | – | – | – | 0.10 | – | – | – | – |
| V_{max} | 0.18 | – | – | 0.38 | – | 0.26 | – | 0.22 |
| B_{max} | – | – | 0.37 | – | – | – | – | – |
| Bz_{min} | 0.69 | 0.66 | 0.21 | 0.48 | 0.66 | 0.73 | 0.66 | 0.61 |
| KT_{min} | – | – | – | – | – | –0.08 | – | – |
| Vb | – | 0.16 | 0.36 | 0.25 | 0.21 | – | – | – |
| Bb | 0.07 | – | – | 0.17 | – | 0.11 | – | – |

ной компоненты ММП, но и от других параметров СВ; б) для рекуррентных и смешанных событий, Dst -индекс имеет хотя и слабую, но статистически значимую связь с параметрами КЛ; в) для рекуррентных событий, зависимость $Dstmin$ от $Bzmin$ слабее, чем от $Bmax$ и Vb . К двум последним выводам надо относиться с осторожностью в силу не очень большого значения коэффициента детерминации в группах СН и MIX. Заметим, что для спорадических событий (независимо от типа солнечного источника) зависимость Dst -индекса от максимальной скорости солнечного ветра статистически значима для возмущений типа *Ejecta* (ICME без MC) и полностью отсутствует для возмущений типа MC.

4. ВЫВОДЫ

На большом экспериментальном материале (944 ФП с 1997 по 2021 гг.), с помощью статистических методов, исследовалось поведение параметров ГА (Kp_{max} , Ap_{max} , $Dstmin$), КЛ (AF , Ax_{max} , Az_{range}), СВ (B_{max} , Bz_{min} , Bb , dB , V_{max} , Vb , dV , KT_{min} , $MCDur$) и солнечной активности (SSN) при $Bz_{min} < -5$ нТл. Сравнивалась геоэффективность межпланетных возмущений и зависимость геомагнитных индексов от параметров КЛ и СВ в разных группах событий: а) выбросы массы из АО, сопровождавшиеся солнечными вспышками (группа CME1); б) волоконные выбросы вне АО (CME2); в) высокоскоростные потоки из корональных дыр (СН); г) смешанные события (MIX); д) спорадические возмущения двух типов при наличии или отсутствии магнитного облака около Земли (CME1 + MC, CME2 + MC, CME1 – MC, CME2 – MC). Исследовалось развитие ФП и геомагнитных возмущений во времени с помощью

временных параметров ($TDstmin$, $Tmin$, TB_{max} , TV_{max}). Анализ распределений и статистических связей геомагнитных индексов и параметров КЛ и СВ показал:

1. Самая высокая геоэффективность характерна для межпланетных возмущений, связанных с CMEs из активных областей, менее высокая – для ICMEs, связанных с волоконными выбросами вне активных областей и смешанных событий, и самая низкая – для CIRs.

2. Разница между распределениями в группах CME1 и CME2 для параметра $Dstmin$ существенно больше, чем для параметра $Bzmin$: на ГА, кроме южной компоненты ММП, влияют и другие характеристики межпланетных возмущений.

3. Спорадические, рекуррентные и смешанные события отличаются не только величиной параметров $Dstmin$ и $Bzmin$, но и характером связи между ними; самая сильная линейная связь характерна для ICMEs, самая слабая – для CIRs.

4. Внутри групп CME1 и CME2 распределения $TDstmin$ и $Tmin$ совпадают; в группах СН и MIX минимум плотности КЛ достигается позже, чем $Dstmin$; развитие ФП и геомагнитных возмущений происходит быстрее для спорадических событий.

5. Интенсивность магнитных бурь, вызванных спорадическими возмущениями, сильнее зависит от наличия или отсутствия MC, чем от типа солнечного источника; характер зависимости $Dstmin$ – $MCDur$ отличается для разных типов источников.

6. Медианы распределений $|Dstmin|$, $|Bzmin|$ и большинства остальных параметров в группах с MC выше, чем в группах без MC; при этом разница между значениями больше для событий, связанных с CMEs из активных областей.

7. Для всех групп событий, кроме СМЕ2 + МС, значения Dst_{min} зависят не только от Vz_{min} , но и от других параметров солнечного ветра; зависимость Dst_{min} – V_{max} статистически значима для ICMEs без МС и незначима в присутствии МС.

8. Распределения временных параметров одинаковы внутри групп СМЕ1 и СМЕ2 независимо от наличия или отсутствия МС; развитие Форбуш-понижений и геомагнитных возмущений самое медленное в группе СМЕ2 + МС.

Полученные закономерности могут быть использованы для изучения физической природы ФП и геомагнитных возмущений, 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 (Neutron Monitor Data Base) (<http://www.nmdb.eu>). Работа базируется на экспериментальных данных Уникальной научной установки (УНУ) “Российская национальная сеть станций космических лучей” (Сеть СКЛ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– 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., Янке Г.В., Оленева В.А., Абунина М.А., Абунин А.А. Метод глобальной съемки для мировой сети нейтронных мониторов // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 3. С. 374–389. 2018.

– Дремухина Л.А., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Динамика межпланетных параметров и геомагнитных индексов в периоды магнитных бурь, инициированных разными типами солнечного ветра // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 59. № 6. С. 683–695. 2019.

– Ермолаев Ю.И. и Ермолаев М.Ю. Солнечные и межпланетные источники геомагнитных бурь: аспекты космической погоды. // Геофизические процессы и биосфера. Т. 8. № 1. С. 5–35. 2009.

– Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // Космич. иссл. 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. 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 межпланет-

ных возмущениях, создающих Форбуш-понижения // Геомагнетизм и аэрономия. 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 аэрономия. Т. 62. № 2. С. 150–170. 2022.

– Родькин Д.Г., Слемзин В.А., Шугай Ю.С. Геомагнитные бури и Форбуш-понижения, связанные с одиночными и комплексными транзитными структурами солнечного ветра // Краткие сообщения по физике ФИАН. Т. 47. № 3. С. 36–43. 2020.

– 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 аэрономия. Т. 61. № 6. С. 694–703. 2021.

– Alves M.V., Echer E., Gonzalez W.D. Geoeffectiveness of corotating interaction regions as measured by Dst index // J. Geophys. Res. V. 111. A07S05. 2006.

– Aslam O.P.M., Badruddin. Study of the Geoeffectiveness and Galactic Cosmic-Ray Response of VarSITI-ISEST Campaign Events in Solar Cycle 24 // Solar Phys. V. 292. Id 135. 2017.

– Badruddin, Kumar A. Study of Forbush-Decreases, Geomagnetic Storms and Ground-Level Enhancements in Selected Intervals and Their Space Weather Implications // Solar Phys. V. 290. P. 1271–1283. 2015.

– 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.

– Belov A.V. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena // Proc. IAU Symposium. № 257. P. 119–130. 2009.

– 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.

– Dumbović M., Devos A., Vršnak B., Sudar D., Rodriguez L., Ruždjak D., Leer K., Vernerstrom S., Veronig A. Geoeffectiveness of Coronal Mass Ejections in the SOHO era // Solar Phys. V. 290. № 2. P. 579–612. 2015.

– 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. Solar connections of geoeffective magnetic structures // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.06.010>

– Gopalswamy N., Akiyama S., Yashiro S., Mäkelä P. Coronal Mass Ejections from Sunspot and non-Sunspot Regions // in 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. 2010.

– 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 // Annales Geophysicae. V. 23. № 2. P. 625–641.

- *Iucci N., Parisi M., Storini M., Villoresi G.* Forbush decreases: origin and development in the interplanetary space // *Nuovo Cimento C. V. 2. P. 1–52.* 1979.
- *Kane R.* Severe geomagnetic storms and Forbush decreases: interplanetary relationships reexamined // *Ann. Geophys. V. 28. P. 479–489.* 2010.
- *Kim R.S., Gopalswamy N., Cho K.S., Moon Y.J., Yashiro S.* Propagation Characteristics of CMEs associated with Magnetic Clouds and Ejecta // *Solar Physics. 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 // *Sol. Phys. V. 291. P. 1025–1041.* 2016.
- *Lockwood J.A.* Forbush decreases in the cosmic radiation // *Space Sci. Revs. V. 12. № 5. P. 658–715.* 1971.
- *Lynch B.J., Zurbuchen T.H., Fisk L.A., Antiochos S.K.* Internal structure of magnetic clouds: Plasma and composition // *Journal of Geophysical Research Space Physics. 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 // *Journal of Geophysical Research. 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 // *Annales 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. Article ID e2020SW002641.* 2021.
- *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.
- *Melkumyan A.A., Belov A.V., Abunina M.A., Shlyk N.S., Abunin A.A., Oleneva V.A., Yanke V.G.* Forbush decreases associated with coronal mass ejections from active and non-active regions: statistical comparison // *MNRAS. V. 515. № 3. P. 4430–4444.* 2022.
- *Melkumyan A.A., Belov A.V., Abunina M.A., Shlyk N.S., Abunin A.A., Oleneva V.A., Yanke V.G.* Statistical comparison of time profiles of Forbush decreases associated with coronal mass ejections and streams from coronal holes in solar cycles 23–24 // *MNRAS. V. 521. № 3. P. 4544–4560.* 2023.
- *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.* Geoeffectiveness (Dst and Kp) of interplanetary coronal mass ejections during 1995–2009 and implications for storm forecasting // *Space Weather. S07005.* 2011.
- *Verbanac G., Živković S., Vršnak B., Bandić M., Hojsak T.* Comparison of geoeffectiveness of coronal mass ejections and corotating interaction regions // *A&A. 558. A85.* 2013.
- *Yermolaev Y.I., Nikolaeva N.S., Lodkina I.G., Yermolaev M.Y.* Geoeffectiveness and efficiency of CIR, sheath, and ICME in generation of magnetic storms. *J. Geophys. Res. 117. ID A00L07.* 2012.