

УДК 524.1.352+539.12

ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С КОРОНАЛЬНЫМИ ДЫРАМИ, КОРОНАЛЬНЫМИ ВЫБРОСАМИ ИЗ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ И ВОЛОКОННЫМИ ВЫБРОСАМИ: СРАВНЕНИЕ В СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛАХ 23 и 24

© 2023 г. А. А. Мелкумян¹, *, А. В. Белов¹, **, М. А. Абунина¹, ***,
Н. С. Шлык¹, А. А. Абунин¹, В. А. Оленева¹, В. Г. Янке¹

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

*e-mail: amelkum@izmiran.ru

**e-mail: abelov@izmiran.ru

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

Поступила в редакцию 28.03.2023 г.

После доработки 28.04.2023 г.

Принята к публикации 25.05.2023 г.

Исследуется сходство и различие Форбуш-понижений в солнечных циклах 23 и 24. Анализ проводился для групп событий, связанных с разными типами солнечных источников: корональными выбросами массы из активных областей, сопровождавшимися солнечными вспышками (группа СМЕ1); волоконными выбросами вне активных областей (группа СМЕ2); высокоскоростными потоками из корональных дыр (группа СН). Исследовались распределения и взаимосвязи различных параметров: амплитуды Форбуш-понижений; максимальных в течение события значений почасового уменьшения плотности космических лучей, экваториальной анизотропии космических лучей, скорости солнечного ветра, напряженности магнитного поля, а также значений скорости солнечного ветра и напряженности магнитного поля за час до начала Форбуш-понижения. Результаты показали, что количество событий, значения параметров и их взаимосвязи зависят от фазы и цикла солнечной активности. В 24-м цикле уменьшилось количество событий в группе СМЕ1, не изменилось в СМЕ2, увеличилось в СН. Значения параметров и разница между ними в разных группах событий выше в цикле 23, характеризующемся большей асимметрией и длинными “хвостами” распределений. Величина Форбуш-понижений в группе СМЕ1 в 23-м цикле зависит сильнее от скорости солнечного ветра, а в цикле 24 – от величины магнитного поля, как и в группе СМЕ2 в обоих солнечных циклах. Множественная линейная регрессия хорошо описывает зависимости параметров Форбуш-понижений в 23-м цикле в группах СМЕ1, СМЕ2, в цикле 24 – в группе СМЕ1.

DOI: 10.31857/S0016794023600394, EDN: UDXKMY

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 [Forbush, 1937; Lockwood, 1971; Iucci et al., 1979]. Убывание плотности галактических КЛ во время ФП часто сопровождается повышенными значениями анизотропии КЛ [Belov, 2008]. В зависимости от типа источника, ФП можно разделить на спорадические, вызванные межпланетными корональными выбросами массы (*Interplanetary Coronal Mass Ejections* – ICMEs) [Cane, 2000], и рекуррентные,

связанные с областями взаимодействия (*Corotating Interaction Regions* – CIRs) высокоскоростных потоков из корональных дыр (*Coronal Holes* – CHs) [Richardson, 2004] со спокойным СВ. В настоящей работе характеристики ФП, спокойного СВ и межпланетных возмущений исследуются в период времени с 1997 по 2019 гг., охватывающий солнечные циклы (*Solar Cycles* – SCs) 23 и 24. Исследование модуляции КЛ на разных фазах солнечной активности в этих циклах проводилось во многих работах, например, [Paouris et al., 2012; Гущина и др., 2014; Aslam and Baddruddin, 2015; Мелкумян и др., 20186]. В работах [Thakur, 2015; Lingri et al., 2016; Мелкумян и др., 2019; Yermolaev et al., 2021, 2022; Крайнев и др., 2021; Melkumyan et al., 2022b; Patel et al., 2022; Shi et al., 2022] срав-

нивались характеристики ФП и межпланетных возмущений в циклах 23–24, максимумах и минимумах солнечной активности (СА). В работе [Thakur, 2015] исследовались статистические связи амплитуды ФП с напряженностью межпланетного магнитного поля (ММП). Было показано, что 31% ФП в SC 23 и только 17% ФП в SC 24 имели амплитуду больше 3%; при этом 22% магнитных облаков в SC 23 и только 10% в SC 24 имели максимальную магнитную индукцию больше 20 нТл; более слабое магнитное поле в SC 24, ожидаемо вызывало более слабые ФП. Lingri et al. [2016] рассматривали ФП с амплитудой больше 2% в минимуме между циклами 23 и 24 (Min 23–24), а также на фазе роста 24-го цикла и в максимуме цикла 24 (Max 24). Анализ связи между амплитудой ФП и параметрами солнечной и геомагнитной активности показал, что ФП с амплитудой больше 2% ассоциируются с быстрыми корональными выбросами массы (*Coronal Mass Ejections* – CMEs) и ударными волнами, которые они создают; фаза роста 24-го цикла характеризуется большим количеством ФП, среди которых нет крупных событий. Мелкумян и др. [2018б] сравнивали количество и величину ФП в солнечных циклах 19–24, а также в максимумах циклов 23 и 24 (Max 23 и Max 24) и в минимуме между этими циклами (Min 23–24). Было показано, что: (а) СА хорошо проявляется в количестве и величине ФП, особенно в событиях большой величины; (б) уменьшение средней величины ФП от максимума к минимуму СА объясняется преобладанием в минимумах рекуррентных ФП; (в) в 24-м цикле количество ФП меньше и они слабее, чем в пяти предыдущих циклах. Melkumyan et al. [2022b] для Max 23, Max 24 и Min 23–24 провели статистическое сравнение параметров временного развития ФП, связанных с CMEs из активных областей, сопровождаемых солнечными вспышками, и с волоконными выбросами за пределами активных областей. Результаты показали: (а) ФП двух типов характеризуются одинаковой фазой спада в Max 23; (б) с учетом всех временных параметров, разница между профилями ФП двух типов заметнее в Max 23, чем в Max 24 и Min 23–24. В работе [Gopalswamy et al., 2010] проводилось сравнение воздействия на гелиосферу выбросов из активных (*Active Region* – AR) и неактивных (non-AR) областей на Солнце в SC 23. Было показано, что активные области продуцируют почти все энергичные CMEs, частота появления которых хорошо коррелирует с числом солнечных пятен, а волоконные выбросы из неактивных областей менее энергичные и их количество от числа солнечных пятен не зависит. Крайнев и др. [2021] исследовали зависимость интенсивности галактических КЛ (низких ≈ 30 МэВ, средних > 100 МэВ и высоких ≥ 10 ГэВ энергий), а также характеристик СА и гелиосферного магнитного поля в рай-

оне орбиты Земли с 1970 по 2020 гг.; сравнивалось поведение исследуемых характеристик в Min 23–24 и в минимумах между циклами: а) 21 и 22, б) 24 и 25. В работе [Yermolaev et al., 2021] для солнечных циклов 21–24 сравнивались четыре типа межпланетных возмущений: (а) CIR; (б) *Sheath*, турбулентная область перед ICME; (в) MC (*Magnetic Cloud*), магнитное облако [Burlaga et al., 1981] – тело ICME с повышенным и регулярным магнитным полем и низкой температурой; (г) *Ejecta*, тело ICME с более слабым и менее регулярным полем. Было показано, что количество ICMEs и *Sheaths* значительно уменьшилось в солнечных циклах 23–24, по сравнению с циклами 21–22, в то время как CIRs распределены более равномерно во времени и их количество в циклах 23–24 не уменьшалось. Кроме того, было показано, что значения большинства параметров ФП, связанных с разными типами вызывающих их возмущений, заметно уменьшились (на 20–40%) в течение перехода от SC 22 к SC 23 и продолжали быть низкими в циклах 23–24. Yermolaev et al. [2022], сравнивая временные профили параметров СВ для тех же типов межпланетных возмущений, показали, что в циклах 23–24 профили всех параметров имеют такую же форму, как и в циклах 21–22, и отличаются только более низкими значениями параметров. Patel et al. [2022], исследуя связи CME–ICME и анализируя характеристики ICMEs в солнечных циклах 23–24, обнаружили существенное уменьшение частоты появления исследуемых событий в SC 24 по сравнению с SC 23. Применение теста Колмогорова–Смирнова для сравнения двух выборок показало, что скорости ICMEs выше в SC 23, чем в SC 24, в то время как все остальные исследуемые параметры (в том числе, индукция магнитного поля и его вертикальной составляющей) в двух солнечных циклах отличаются статистически незначимо. Shi et al. [2022] рассматривали два типа ICMEs: связанные и не связанные с солнечными вспышками. Было показано, что: (а) частота появления ICMEs обоих типов убывает от максимума к минимуму СА; (б) для ICMEs, связанных со вспышками, продолжительность событий больше и зависимость их характеристик от СА сильнее.

Проведенные исследования показывают, что вызванные различными типами солнечных источников возмущения СВ и регистрируемые наземными нейтронными мониторами ФП являются частью проявлений СА. Целью представленной работы является: (а) исследование изменения параметров ФП и их связи с СА и мощностью межпланетных возмущений с 1997 по 2019 гг. (группа FULL); (б) сравнение поведения параметров ФП в SC 23 (1997–2008 гг.) и SC 24 (2009–2019 гг.), а также в максимумах этих циклов и минимуме между ними, для событий, связанных с разными типами солнечных источников: группа

СМЕ1 – ФП, связанные с корональными выбросами из активных областей, сопровождавшимися солнечными вспышками (AR CMEs); группа СМЕ2 – ФП, вызванные межпланетными возмущениями от волоконных выбросов из регионов за пределами активных областей (non-AR CMEs); группа СН – ФП, связанные с областями взаимодействия высокоскоростных потоков из корональных дыр со спокойным СВ.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В настоящей работе используются данные о вариациях КЛ, параметрах межпланетной среды и характеристиках СА, взятые из созданной и поддерживаемой в ИЗМИРАН базы данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений (*Forbush Effects and Interplanetary Disturbances – FEID*) (<http://tools.izmiran.ru/aid/>). Следует подчеркнуть, что эта база данных включает практически все крупномасштабные возмущения СВ различных типов за несколько последних солнечных циклов. Это позволяет проводить полный статистический анализ, сравнивая различные циклы или отдельные периоды внутри них. Представленные в базе данных почасовые значения вариаций плотности и анизотропии КЛ рассчитаны по данным мировой сети нейтронных мониторов методом глобальной съемки [Белов и др., 2018]. Результаты получены для частиц с жесткостью 10 ГВ, наиболее близкой к эффективной жесткости частиц, регистрируемых нейтронными мониторами. Почасовые значения параметров СВ взяты из базы данных OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>) [King and Papitashvili, 2005]. База данных FEID также содержит данные о солнечных вспышках GOES X-ray Data Lists of Space Weather Prediction Centre (<http://www.swpc.noaa.gov/products/igoes-x-ray>) и количестве солнечных пятен (<https://www.sidc.be/silso/datafiles>). Для установления солнечного источника конкретного ФП используется комплексный анализ солнечных и межпланетных данных [Мелкумян и др., 2018а, Melkumyan et al., 2022а]. В настоящей работе рассматриваются только те ФП из базы данных FEID, которые надежно ассоциированы с солнечными источниками. В качестве параметров ФП используются максимальные (в течение ФП) значения вариаций плотности КЛ (амплитуда или величина ФП – AF), почасового уменьшения плотности КЛ (D_{min}), экваториальной анизотропии КЛ ($A_{x_{max}}$), скорости СВ (V_{max}), индукции ММП (B_{max}), а также значения скорости СВ (V_b) и индукции ММП (B_b) за час до начала события. В рамках данной работы СА характеризуется параметром SSN (*Sunspot Number*), равным числу солнечных пятен в день начала ФП. Подчеркнем, что учитывается именно число пятен в день регистрации крупномасштабных возмущений в околозем-

ном космическом пространстве и ФП. Конечно, было бы правильнее использовать число солнечных пятен в день регистрации солнечного события, ставшего причиной ФП, но на исследуемых масштабах времени разница нам кажется несущественной. За начало ФП принимается момент прихода ударной волны, в качестве индикатора которой используется внезапное начало геомагнитной бури (*Sudden Storm Commencement – SSC*) по данным (https://isgi.unistra.fr/data_download.php). Отметим, что к событиям с внезапным началом нами также были отнесены и те, в которых был зарегистрирован внезапный импульс (*Sudden Impulse – SI*) по данным отдельных станций или космических аппаратов. При отсутствии этих индикаторов, началом ФП считаются резкие изменения основных параметров межпланетной среды (скорости СВ и/или индукции ММП) и/или КЛ. В качестве характеристики возмущенности межпланетной среды используется параметр $VmBm = V_{max}B_{max}/V_0B_0$, где V_0 и B_0 – типичные значения скорости СВ и индукции ММП, равные 400 км/с и 5 нТл соответственно [Belov et al., 2001]. Пример ФП из базы данных FEID приведен на рис. 1, где показаны почасовые значения параметров межпланетной среды (верхняя панель), вариаций КЛ (средняя панель) и геомагнитной активности (нижняя панель). В качестве характеристик межпланетной среды используется индукция ММП (B , левая шкала) и скорость СВ (V , правая шкала); вариации КЛ характеризуются изменениями плотности (A_0 , левая шкала) и экваториальной составляющей анизотропии (A_x , правая шкала); на нижней панели приведены индексы геомагнитной активности (K_p , левая шкала; Dst , правая шкала, (<ftp://ftp.gfz-potsdam.de/pub/home/obs/kp-ap/wdc>), [Matzka et al., 2021], (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/index.html>). Начало ФП, совпадающее с моментом регистрации SSC, отмечено вертикальной линией.

Приведенное на рис. 1 ФП было зарегистрировано 24–26 января 2012 г., после наблюдавшейся на Солнце вспышки (M8.7 с координатами N18W25, 23.01.2012 г. в 03:38 UT) и связанным с ней гало СМЕ (23.01.2012 г. в 04:00 UT, с начальной скоростью 2175 км/с). В данном событии были зарегистрированы следующие экстремальные значения параметров: $V_{max} = 673$ км/с, $B_{max} = 16.4$ нТл, $AF = 3.2\%$, $A_{x_{max}} = 1.59\%$. В геомагнитной активности наблюдались возмущенные периоды: $K_{p_{max}} = 4+$, $Dst_{min} = -75$ нТл.

В настоящей работе для исследования параметров ФП в SC 23 (1997–2008 гг.) и SC 24 (2009–2019 гг.) использовался статистический анализ данных, обеспеченный большим количеством используемых событий ($N = 801$). Для сравнения ФП в разных группах событий в различные периоды СА строились графики ежегодных медианных значений параметров, гистограммы, диа-

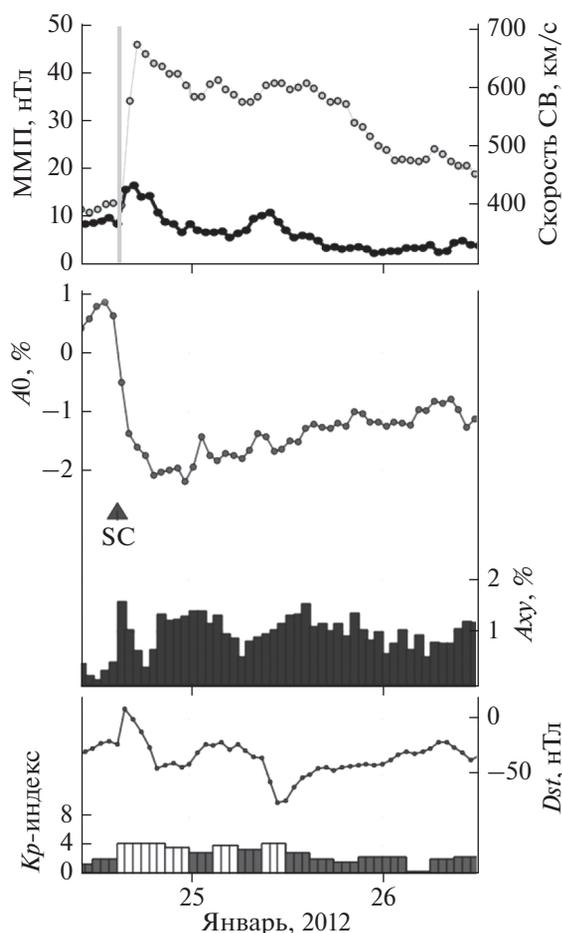


Рис. 1. Пример ФП 24–26 января 2012 г. из базы данных FEID.

граммы размаха; вычислялись средние значения, медианы и межквартильные интервалы (*Inter Quartile Ranges* – IQRs) распределений, парные и частные коэффициенты корреляции, использовался метод множественной линейной регрессии. Для оценки согласия распределений параметров с нормальным/логнормальным законами вычислялась статистика Колмогорова–Смирнова и уровень значимости p ; гипотеза о нормальности/логнормальности распределения принималась при $p > 0.05$. Для исследования статистических связей между параметрами вычислялись парные коэффициенты корреляции и частные коэффициенты корреляции, показывающие силу связи между двумя переменными при устранении влияния остальных переменных. Для сравнения коэффициентов корреляции в двух независимых выборках вычислялась z -статистика и уровень значимости p ; разница между двумя коэффициентами считалась статистически значимой при $p < 0.05$. Оценка тесноты корреляционной связи давалась по шкале Чеддока: $r < 0.3$ – слабая, $0.3 \leq$

$r < 0.5$ – умеренная, $0.5 \leq r < 0.7$ – значительная, $r \geq 0.7$ – сильная. Для сравнения зависимостей между параметрами вариаций КЛ (зависимые переменные) и характеристиками СВ (предикторы) использовался метод множественной регрессии: вычислялись стандартизированные коэффициенты регрессии, показывающие долю дисперсии зависимой величины, объясняемую данным предиктором. Качество регрессионного анализа оценивалось с помощью коэффициента детерминации, показывающего долю дисперсии зависимой величины, которую объясняют все используемые предикторы.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Анализ ежегодных изменений количества ФП, параметров КЛ, СА и межпланетной среды с 1997 по 2019 гг.

Ежегодное количество ФП (N) и ежегодные значения медиан распределений параметров SSN , AF , $A_{ху}$, B_{max} , Bb , V_{max} , Vb показаны на рис. 2. На рисунке хорошо видна периодичность изменения медианных значений параметров и их связь с изменениями СА. Медианные значения количества солнечных пятен (в день начала ФП) в Max 23 (1999–2002 гг., $153 \leq SSN \leq 176$) больше, чем в Max 24 (2012–2015 гг., $56 \leq SSN \leq 133$), и существенно больше, чем в Min 23–24 ($0 \leq SSN \leq 28$). Значения поля возмущенного СВ, во время ФП (Max 23: $12.3 \text{ нТл} \leq B_{max} \leq 14.3 \text{ нТл}$; Max 24: $10.3 \text{ нТл} \leq B_{max} \leq 12.8 \text{ нТл}$; Min 23–24: $8.8 \text{ нТл} \leq B_{max} \leq 11.7 \text{ нТл}$) и спокойного СВ, за час до начала ФП: (Max 23: $6.1 \text{ нТл} \leq Bb \leq 7.0 \text{ нТл}$; Max 24: $4.6 \text{ нТл} \leq Bb \leq 6.0 \text{ нТл}$; Min 23–24: $3.5 \text{ нТл} \leq Bb \leq 4.5 \text{ нТл}$) меньше в Max 24 и Min 23–24 по сравнению с Max 23. Известно, см., например, [Gopalswamy et al., 2020], что 24-й солнечный цикл слабее и мощность возмущений СВ в нем меньше, чем в цикле 23, так что результаты, полученные для значений ММП в Max 23 и Max 24, соответствуют общей характеристике этих циклов.

Медианные значения амплитуды ФП также выше в Max 23 ($1.5\% \leq AF \leq 1.8\%$), чем в Max 24 ($0.9\% \leq AF \leq 1.3\%$) и, тем более, в Min 23–24 ($0.7\% \leq AF \leq 0.9\%$); превышение над значениями в минимуме СА для Max 23 заметнее, чем для Max 24. Разница между медианами экваториальной анизотропии КЛ в Max 23 ($1.42\% \leq A_{ху} \leq 1.84\%$) и Max 24 ($1.16\% \leq A_{ху} \leq 1.56\%$) небольшая, но значения в Min 23–24 ($0.79\% \leq A_{ху} \leq 1.07\%$) существенно меньше, чем в максимумах. Низкие значения амплитуды ФП в Min 23–24 могут быть связаны с тем, что в этот период ФП вызваны, главным образом, высокоскоростными потоками из корональных дыр [Мелкумян и др., 2018б] и/или быть следствием уменьшения магнитного поля в ICMEs, вызванного их аномальным рас-

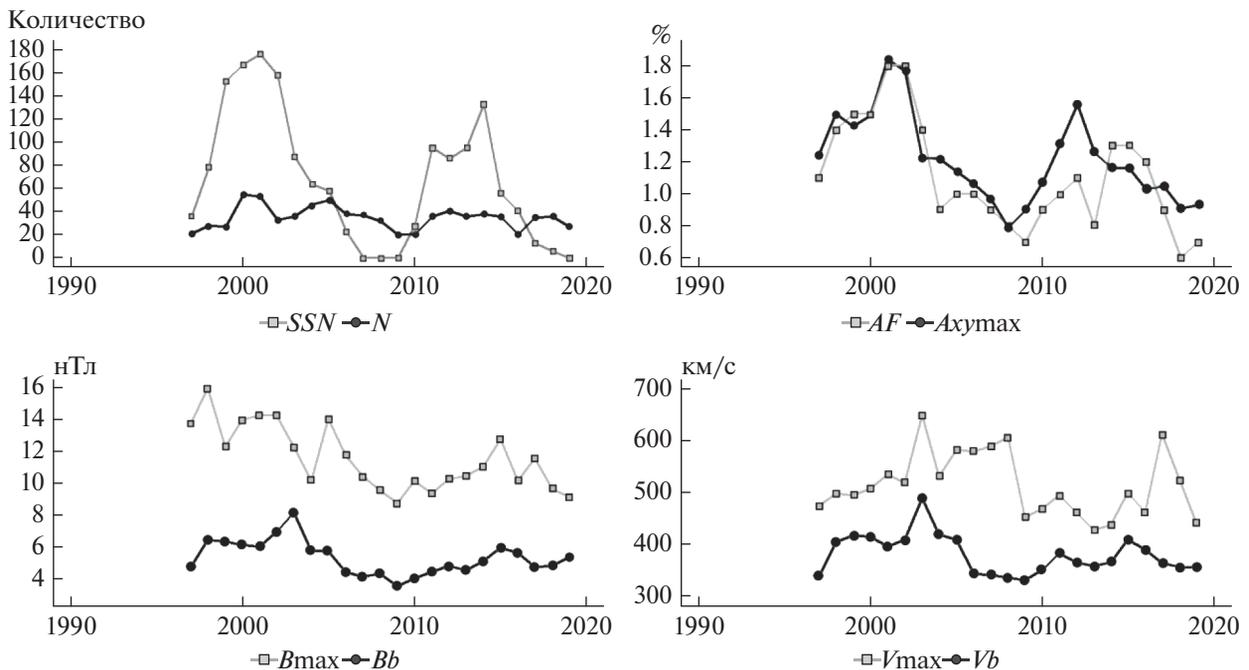


Рис. 2. Ежегодное количество ФП (N) и ежегодные значения медиан распределений параметров SSN , AF , $A_{хутах}$, B_{max} , B_b , V_{max} , V_b для группы FULL.

ширением [Gopalswamy et al., 2015]. Известно, что величина экваториальной анизотропии КЛ хорошо коррелирует с величиной ФП [Belov, 2008; Абунин и др., 2012]. На рис. 2 большую часть 23-го цикла кривые среднегодовых значений этих величин хорошо согласуются друг с другом, в то время как в 24-м цикле ситуация существенно меняется и согласия между поведением двух кривых не наблюдается. Сравнивая коэффициенты корреляции между AF и $A_{хутах}$ в SC 23 ($r = 0.77$, $N = 456$) и SC 24 ($r = 0.55$, $N = 345$), получаем, что зависимость между амплитудой ФП и экваториальной анизотропией КЛ существенно сильнее в 23-м цикле, чем в 24-м ($\tau = 5.63$, $p < 0.001$). Это одна из особенностей необычного 24-го цикла, которая требует дополнительного изучения.

На рис. 3 представлено ежегодное количество ФП (N) и ежегодные медианы распределений параметров SSN , AF , $A_{хутах}$, B_{max} , B_b , V_{max} , V_b для трех групп событий. Количество ФП, связанных с AR CMEs, в 24-м цикле ($N = 103$) упало почти вдвое по сравнению с 23-м циклом ($N = 198$), в то время как количество ФП, связанных с волоконными выбросами (соответственно, 109 и 98), почти не изменилось. Это хорошо согласуется с результатами, полученными в Shi et al. [2022], которые сравнивали в 23-м и 24-м циклах два типа ICMEs, разделенные по средним значениям зарядового состояния железа Q_{Fe} . Было получено, что количество ICMEs, связанных с солнечными

вспышками (высокие значения Q_{Fe}), сильно упало в 24-м цикле по сравнению с 23-м, в то время как количество ICMEs, не связанных с солнечными вспышками (низкие значения Q_{Fe}), не уменьшилось.

Полученная в настоящей работе частота появления рекуррентных ФП в 23-м цикле ($N = 160$) также больше, чем в 24-м ($N = 133$), но различие между циклами меньше, чем для спорадических событий (соответственно, 296 и 212). Это согласуется с результатами, полученными Yermolaev et al. [2021] при сравнении циклов 21–22 и 23–24: события, связанные с CIRs, более равномерно распределены во времени. Сравнивая частоту появления ФП разного типа, видим, что соотношение между спорадическими и рекуррентными событиями в SC 23 (спорадические ФП составляют 65%, рекуррентные ФП – 35%) и SC 24 (соответственно, 62% и 38%) примерно одинаково. Из рис. 3 видно, что для всех групп событий количество ФП внутри каждого цикла распределено неравномерно по разным периодам СА. На максимумы приходится примерно половина событий в группе CME1 ($N = 108$) в SC 23 и в группе CME2 в циклах 23 ($N = 48$) и 24 ($N = 61$). Для группы CME1, в Max 24 ($N = 75$) оказалось больше 70% всех событий цикла, а для рекуррентных ФП больше трети событий относятся к Min 23–24 ($N = 115$). Два последних результата еще раз подтверждают более слабую СА в 24-м цикле и более равномер-

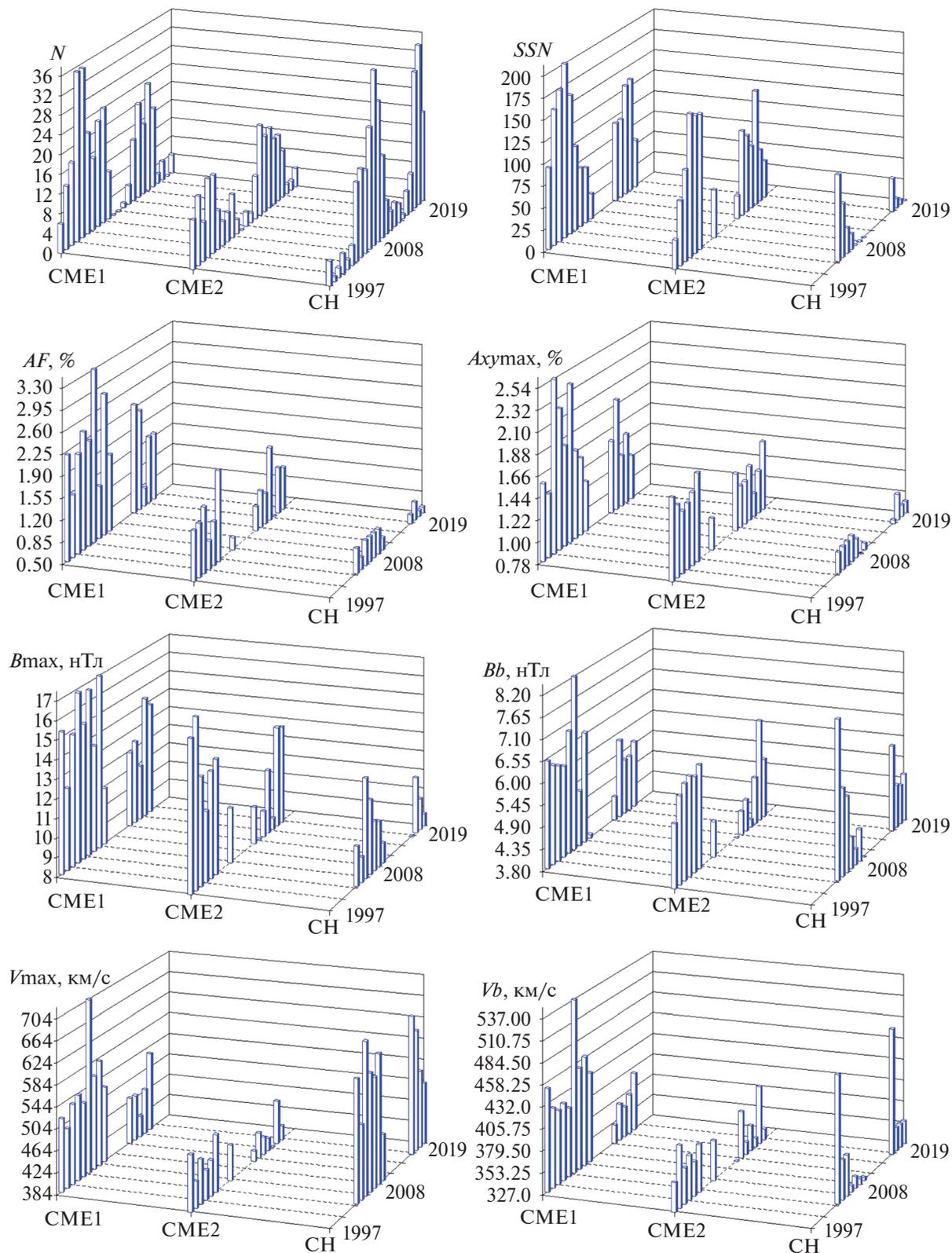


Рис. 3. Ежегодное количество ФП (N) и ежегодные значения медиан распределений (при $N > 8$) параметров SSN , AF , $A_{хутах}$, B_{max} , B_b , V_{max} , V_b для групп CH, CME1, CME2.

ное распределение рекуррентных событий по времени.

Из рис. 3 также видно, что число солнечных пятен в день начала ФП, в целом, больше в группе СМЕ1 ($155 \leq SSN \leq 200$), чем в СМЕ2 ($103 \leq SSN \leq 162$) в Мах 23, и практически одинаково в обеих группах в Мах 24 ($56 \leq SSN \leq 133$ в СМЕ1; $60 \leq SSN \leq 134$ в СМЕ2). Gopalswamy et al. [2010] показали, что частота появления AR CMEs коррелирует с числом солнечных пятен, в то время как количество волоконных выбросов вне активных областей (non-AR CMEs) от числа солнечных пятен не зависит. Результаты, представленные в настоящей работе, показывают, что и в 24-м цикле количество ФП, связанных с non-AR CMEs, слабо зависит от числа солнечных пятен, в то время как ФП, связанные с AR CMEs, чаще наблюдаются при высоких значениях SSN .

Что касается амплитуды ФП, то в Мах 23 для событий, связанных с AR CMEs ($1.5\% \leq AF \leq 2.4\%$), амплитуда больше, чем для событий, связанных с non-AR CMEs ($0.9\% \leq AF \leq 1.9\%$). В Мах 24 соотношение между амплитудами такое же, но разница значений слабее ($0.8\% \leq AF \leq 2.2\%$ в группе СМЕ1; $0.5\% \leq AF \leq 1.7\%$ в группе СМЕ2). Таким образом, более контрастный по значениям SSN солнечный цикл 23 вызывает ФП с большим разбросом амплитуды в обеих группах спорадических событий.

Что касается индукции ММП, значения поля возмущенного СВ немного больше в Мах 23, чем в Мах 24, как для группы СМЕ1 (Мах 23: $12.2 \text{ нТл} \leq B_{\text{max}} \leq 16.8 \text{ нТл}$, Мах 24: $10.8 \text{ нТл} \leq B_{\text{max}} \leq 14.3 \text{ нТл}$), так и для группы СМЕ2 (Мах 23: $11.6 \text{ нТл} \leq B_{\text{max}} \leq 13.9 \text{ нТл}$; Мах 24: $8.5 \text{ нТл} \leq B_{\text{max}} \leq 13.2 \text{ нТл}$). Аналогично ведут себя и значения магнитного поля спокойного СВ, но разница между максимумами СА в группе СМЕ1 (Мах 23: $6.1 \text{ нТл} \leq Bb \leq 6.9 \text{ нТл}$, Мах 24: $5.2 \text{ нТл} \leq Bb \leq 5.8$) заметнее, чем в группе СМЕ2 (Мах 23: $6.2 \text{ нТл} \leq Bb \leq 6.4 \text{ нТл}$; Мах 24: $4.0 \text{ нТл} \leq Bb \leq 6.4$). Обращает на себя внимание, что разброс значений магнитного поля для группы СМЕ2 значительно больше в Мах 24 (2.4 нТл), чем в Мах 23 (0.2 нТл).

Результаты, представленные на рис. 2 и 3, хорошо иллюстрируют цикличность изменения параметров ФП и межпланетных возмущений и их связь с изменениями СА, но не позволяют численно оценить соотношения между параметрами. Таковую возможность дают статистические методы, использование которых базируется на большом объеме данных. Результаты статистического анализа параметров ФП в разных группах событий для солнечных циклов 23 и 24 изложены ниже.

3.2. Анализ распределений параметров КЛ, СА, межпланетной среды и мощности межпланетных возмущений в солнечных циклах 23 и 24

Из рис. 2 и 3 видно, что ежегодное количество событий достаточно большое ($20 \leq N \leq 55$), чтобы проводить сравнительный статистический анализ параметров ФП в разные периоды солнечной активности с большой степенью надежности. С использованием статистических методов, мы сравнивали распределения параметров ФП в четырех группах событий (FULL, СМЕ1, СМЕ2, СН) в солнечных циклах 23 и 24. Для оценки нормальности/логнормальности распределений параметров использовался критерий согласия Колмогорова–Смирнова: вычислялись выборочные значения статистики Колмогорова–Смирнова и уровень значимости p ; гипотеза о нормальности/логнормальности распределения принималась при $p > 0.05$. В табл. 1 представлены значения вычисленного уровня значимости, показывающие согласие выборочных распределений с нормальным или логнормальным законом. Результаты, представленные в табл. 1, показывают, что нормальному закону подчиняется только распределение параметра SSN в группе СМЕ1 в солнечном цикле 24. В то же время, все параметры ФП в группе СМЕ2 и почти все в группе СМЕ1 (кроме D_{min} и Bb в SC 23) распределены логнормально. В группе СН логнормальному закону не подчиняются только распределения амплитуды ФП (AF) и максимальной скорости возмущенного СВ (V_{max}). Отметим, что логнормальное распределение – это простейшее распределение, описывающее процессы, в которых изменение параметра под каким-либо внешним воздействием зависит от предыдущего значения этого параметра; нормальное распределение описывает случайные процессы, в которых такая зависимость отсутствует.

На рис. 4 представлены гистограммы распределений характеристик СА (SSN), мощности межпланетных возмущений ($VmBm$), вариаций КЛ (AF , $A_{\text{хутах}}$) и параметров межпланетной среды (V_{max} , Vb , B_{max} , Bb) для группы FULL в солнечных циклах 23 и 24. Визуальный анализ гистограмм и значения асимметрии и эксцесса распределений (см. табл. 1) показывают, что в обоих солнечных циклах распределения параметров ФП (кроме $A_{\text{хутах}}$, V_{max} , Vb) островершинные со значительной правосторонней асимметрией; распределения параметров $A_{\text{хутах}}$, V_{max} , Vb более симметричные и плосковершинные. Схожесть распределений максимальной скорости СВ и анизотропии КЛ подтверждается результатами регрессионного анализа, которые будут представлены в разделе 3.3. Распределения всех параметров имеют длинные “хвосты” в области больших значений для событий, наблюдавшихся в солнечном цикле 23. Почти для всех параметров остро-

Таблица 1. Проверка соответствия распределений параметров нормальному/логнормальному закону с использованием критерия Колмогорова–Смирнова (показаны значения $p > 0.5$) и выборочных значений асимметрии (A) и эксцесса (E)

Параметр	Цикл	p				A	E
		логнормальное распределение					
		FULL	CME1	CME2	CH	FULL	
AF	SC 23	–	>0.250	0.176	–	3.86	23.45
	SC 24	–	>0.250	>0.250	–	3.01	12.25
D_{min}	SC 23	–	–	0.088	0.197	4.72	30.18
	SC 24	–	0.214	>0.500	–	2.82	8.98
$A_{x_{max}}$	SC 23	0.105	>0.500	>0.250	>0.500	3.26	19.91
	SC 24	–	0.149	>0.250	0.139	1.54	2.31
B_{max}	SC 23	>0.500	>0.500	>0.250	0.101	2.38	7.58
	SC 24	0.141	>0.500	>0.500	>0.500	1.86	4.34
Bb	SC 23	0.072	–	>0.500	0.126	2.46	12.12
	SC 24	>0.250	>0.250	>0.500	0.146	1.27	3.35
V_{max}	SC 23	>0.250	>0.500	>0.500	–	2.58	15.90
	SC 24	–	>0.250	>0.500	–	0.65	–0.31
Vb	SC 23	–	0.131	>0.250	0.088	1.43	3.43
	SC 24	–	>0.500	0.202	–	1.13	1.41
$VmBm$	SC 23	>0.250	>0.500	0.080	>0.250	4.48	28.46
	SC 24	–	>0.250	>0.500	>0.500	2.22	6.50
		Нормальное распределение					
SSN	SC 23	–	–	–	–	0.72	–0.21
	SC 24	–	>0.150	–	–	0.57	–0.80

вершинность (“крутость”) распределений, определяемая значениями эксцесса, гораздо заметнее в солнечном цикле 24. Так, значения эксцесса распределения параметра $VmBm$ (4.5 в SC 23; 28.5 в SC 24) свидетельствуют о близости межпланетных возмущений по мощности в цикле 24 и большим разбросе в цикле 23. Распределения числа солнечных пятен в циклах 23 и 24 отличаются от распределений остальных параметров большей шириной (отрицательный эксцесс) и слабой положительной асимметрией (<1).

На рис. 5 для трех групп событий (CME1, CME2, CH) показаны диаграммы размаха параметров SSN , $VmBm$, AF , $A_{x_{max}}$, B_{max} , Bb , V_{max} , Vb в солнечных циклах 23 и 24. В табл. 2 для этих же групп событий и группы FULL приведены средние значения, медианы и IQRs распределений этих параметров в двух солнечных циклах. Для сравнения групп событий использовались также средние значения параметров $dB = B_{max} - Bb$ и $dV = V_{max} - Vb$, которые показывают разницу между характеристиками возмущенного и спокойного СВ и могут быть использованы для оценки возможного влияния области взаимодействия

(*Sheath* или CIR) на модуляцию КЛ. Для параметра dB , 95%-ные интервалы достоверности средних значений в солнечных циклах 23 и 24 перекрываются: на 0.7 нТл в группе CME1 (SC 23: 9.4–12.0 нТл; SC 24: 7.3–10.1 нТл), на 0.9 нТл в группе CME2 (SC 23: 6.8–9.4 нТл; SC 24: 5.9–7.7 нТл) и на 0.2 нТл в группе CH (5.4–6.8 нТл в SC 23 и 4.4–5.6 нТл в SC 24). Незначительное пересечение интервалов достоверности в группе CH ($\leq 4\%$) позволяет считать превышение величины возмущенного магнитного поля над фоновым в этой группе большим в 23-м цикле, чем в 24-м. Интервалы достоверности параметра dV в группе CH не пересекаются в солнечных циклах 23 и 24: границы интервала значимо выше в SC 23 (189–223 км/с), чем в SC 24 (147–179 км/с), видимо, потому, что в 23-м цикле потоки из корональных дыр были более высокоскоростными. В группах CME1 и CME2, хотя интервалы достоверности параметра dV в двух циклах формально перекрываются (CME1: 126–164 км/с в SC 23, 93–130 км/с в SC 24; CME2: 71–106 км/с, 60–81 км/с), но пересечение очень маленькое для выбросов из активных областей и можно считать, что разница между

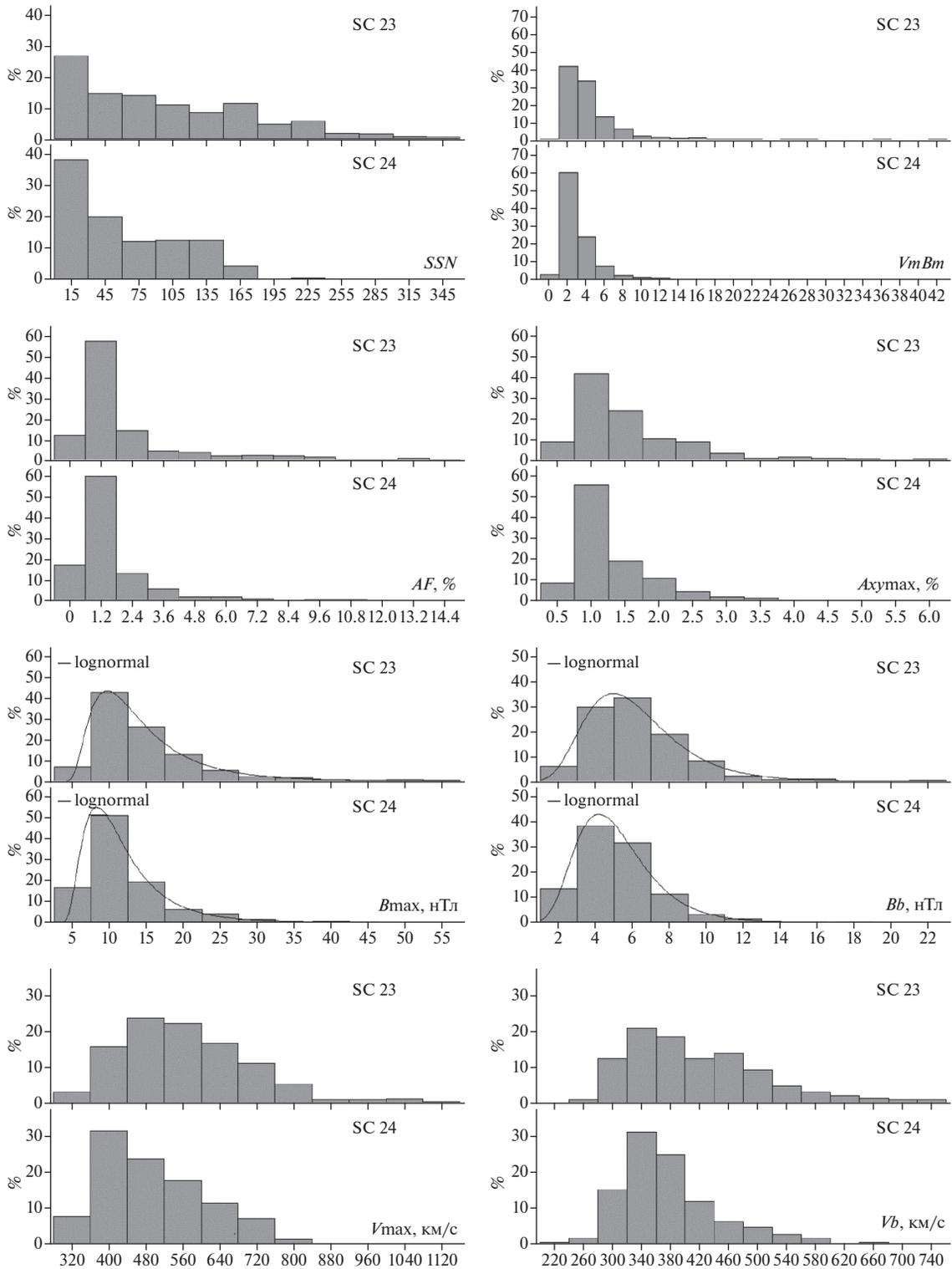


Рис. 4. Гистограммы параметров SSN , D_{min} , AF , $A_{сумax}$, B_{max} , V_{max} , B_b , V_b в солнечных циклах 23 и 24 для группы FULL.

скоростями возмущенного и фонового СВ значительно больше в SC 23. По-видимому, это говорит о том, что области взаимодействия оказались менее эффективны в 24-м цикле по сравнению с 23-м. При этом, в обоих солнечных циклах среднее зна-

чение параметра dB в группе CME1 выше, чем в группах CME2 и CH. Это обычное явление, поскольку самые сильные поля межпланетных возмущений наблюдаются именно в выбросах из активных областей [Gopalswamy et al., 2010; Mel-

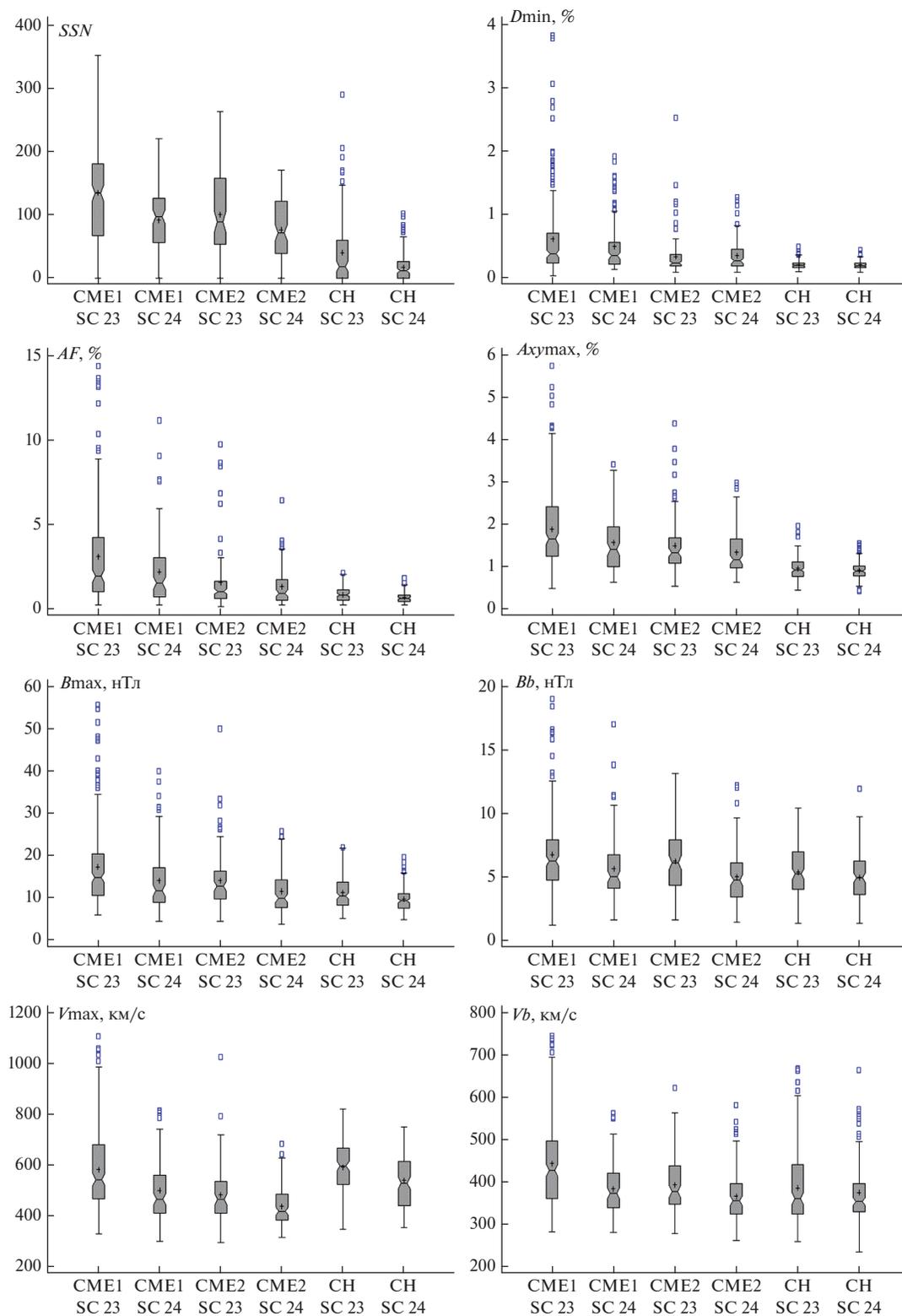


Рис. 5. Диаграммы размаха параметров SSN , D_{min} , AF , $A_{хутах}$, $V_{тах}$, $V_{тах}$, B_b , V_b в солнечных циклах 23 и 24 для групп CH, CME1, CME2.

Таблица 2. Средние значения, медианы и IQRs распределений параметров

Параметр	Цикл	Статистика	FULL	CME1	CME2	СН
<i>AF</i>	SC 23	Среднее	2.10 ± 0.12	3.29 ± 0.25	1.62 ± 0.17	0.90 ± 0.03
		Медиана	1.2	2.0	1.1	0.9
		IQR	0.8–2.1	1.1–4.3	0.7–1.7	0.6–1.2
	SC 24	Среднее	1.37 ± 0.07	2.26 ± 0.20	1.38 ± 0.10	0.77 ± 0.03
	Медиана	0.9	1.6	1.0	0.7	
	IQR	0.6–1.5	0.8–3.1	0.6–1.8	0.5–0.9	
<i>Dmin</i>	SC 23	Среднее	0.44 ± 0.03	0.67 ± 0.05	0.35 ± 0.03	0.22 ± 0.01
		Медиана	0.26	0.40	0.24	0.21
		IQR	0.19–0.42	0.25–0.74	0.20–0.38	0.17–0.25
	SC 24	Среднее	0.35 ± 0.01	0.51 ± 0.04	0.36 ± 0.02	0.22 ± 0.01
	Медиана	0.25	0.36	0.28	0.20	
	IQR	0.19–0.38	0.23–0.57	0.20–0.46	0.17–0.25	
<i>Aхuтах</i>	SC 23	Среднее	1.52 ± 0.04	1.97 ± 0.08	1.52 ± 0.07	0.97 ± 0.02
		Медиана	1.25	1.68	1.36	0.94
		IQR	0.93–1.81	1.27–2.45	1.10–1.70	0.78–1.13
	SC 24	Среднее	1.25 ± 0.03	1.59 ± 0.06	1.36 ± 0.05	0.94 ± 0.02
	Медиана	1.05	1.43	1.18	0.92	
	IQR	0.89–1.50	1.02–1.96	0.99–1.68	0.81–1.03	
<i>Bmax</i>	SC 23	Среднее	14.77 ± 0.38	17.71 ± 0.72	14.29 ± 0.69	11.43 ± 0.30
		Медиана	12.5	15.0	12.95	10.65
		IQR	9.6–17.3	10.7–20.5	10.0–16.5	8.4–13.85
	SC 24	Среднее	11.67 ± 0.29	14.33 ± 0.76	11.75 ± 0.49	9.96 ± 0.24
	Медиана	9.9	11.9	10.1	9.5	
	IQR	7.9–13.7	9.1–17.3	7.9–14.5	7.8–11.2	
<i>Iтах</i>	SC 23	Среднее	570.2 ± 7.6	595.2 ± 14.4	482.9 ± 10.9	592.8 ± 8.2
		Медиана	549	547	466	597
		IQR	461–660	468–684	411–535	525–668
	SC 24	Среднее	495.2 ± 5.8	500.5 ± 12.2	438.3 ± 7.7	539.4 ± 8.8
	Медиана	472	465	419	530	
	IQR	410–561	411–560	383–485	441–616	
<i>Bb</i>	SC 23	Среднее	6.26 ± 0.14	7.01 ± 0.26	6.21 ± 0.25	5.36 ± 0.15
		Медиана	5.8	6.25	6.10	5.20
		IQR	4.4–7.4	4.8–8.0	4.3–7.9	4.0–6.95
	SC 24	Среднее	5.16 ± 0.12	5.62 ± 0.25	4.98 ± 0.20	4.95 ± 0.16
	Медиана	4.9	5.0	4.7	4.9	
	IQR	3.7–6.2	4.1–6.7	3.4–6.1	3.6–6.2	
<i>Iь</i>	SC 23	Среднее	416.0 ± 4.7	450.2 ± 8.0	394.2 ± 7.1	387.0 ± 6.7
		Медиана	390	429.5	378.5	361.5
		IQR	342–469	362–499	348–440	325–442
	SC 24	Среднее	376.2 ± 3.6	385.3 ± 6.3	367.7 ± 6.2	376.2 ± 6.1
	Медиана	362	374	357	355	
	IQR	330–408	340–422	325–398	331–397	
<i>SSN</i>	SC 23	Среднее	94.3 ± 3.7	134.8 ± 5.4	100.6 ± 6.6	40.3 ± 4.0
		Медиана	75	134	89	18.5
		IQR	26–152	67–181	54–158	0–60
	SC 24	Среднее	55.9 ± 2.7	91.8 ± 4.5	76.7 ± 4.5	17.0 ± 2.0
	Медиана	41	97	72	12	
	IQR	12–98	56–126	39–122	0–26	

Таблица 3. Количество ФП (N) и коэффициенты корреляции (r) между параметрами AF , $VmBm$, $Bmax$, $Vmax$, dB , dV для солнечных циклов 23 и 24 в разных групп событий

Цикл	Группа	СМЕ1	СМЕ2	СН
SC 23	N	198	98	160
	Парные коэффициенты корреляции			
	$r(AF, VmBm)$	0.82	0.72	0.67
	$r(Vmax, Bmax)$	0.51	0.55	0.42
	$r(dB, dV)$	0.66	0.66	0.75
	Частные коэффициенты корреляции			
	$r(AF, Vmax)$	0.57	0.23	0.26
	$r(AF, Bmax)$	0.57	0.58	0.57
	$r(AF, dV)$	0.56	0.24	0.30
	$r(AF, dB)$	0.42	0.52	0.25
SC 24	N	103	109	133
	Парные коэффициенты корреляции			
	$r(AF, VmBm)$	0.80	0.69	0.58
	$r(Vmax, Bmax)$	0.61	0.39	0.45
	$r(dB, dV)$	0.75	0.61	0.65
	Частные коэффициенты корреляции			
	$r(AF, Vmax)$	0.32	0.22	0.27
	$r(AF, Bmax)$	0.59	0.62	0.42
	$r(AF, dV)$	0.34	–	0.38
	$r(AF, dB)$	0.45	0.53	0.22

kumyan et al., 2022a]. Среднее значение параметра dV оказалось выше в группе СН, чем в группах СМЕ1 и СМЕ2, так как для большинства потоков из корональных дыр скорости существенно превышают фоновые, а среди СМЕ довольно часто попадаются и низкоскоростные межпланетные возмущения, скорости которых близки к скорости фонового СВ.

Из рис. 5 видно, что в каждой группе событий IQRs параметра $Bmax$ в солнечных циклах 23 и 24 перекрываются, хотя верхние границы распределений в SC 23 существенно выше. Это частично совпадает с результатом, полученным Patel et al. [2022], где применение теста Колмогорова–Смирнова для сравнения двух выборок показало, что распределения индукции магнитного поля ICMEs в солнечных циклах 23 и 24 отличаются статистически незначимо. В то же время, по диаграммам размаха и по результатам для группы FULL видно существенное превышение квартилей распределения $Bmax$ в SC 23 по сравнению с SC 24, то есть усиление ММП в цикле 23, по сравнению с циклом 24. Мощность возмущений СВ оценивается параметром $VmBm$, который в группе

СМЕ1, ожидаемо, больше в 23-м цикле ($median = 4.0$, $IQR = 2.6–6.8$), чем в 24-м ($median = 2.7$, $IQR = 1.93–4.94$). Такая же тенденция прослеживается для групп СМЕ2 (SC 23: $median = 3.0$, $IQR = 2.2–4.2$; SC 24: 2.3, 1.6–3.2) и СН (SC 23: $median = 3.1$, $IQR = 2.3–4.5$; SC 24: 2.6, 1.9–3.3). В целом, различия мощности возмущений в циклах 23 и 24 сильнее выражены в разбросе значений параметра $VmBm$, чем в средних величинах (в группе СМЕ1: $1.3 \leq VmBm \leq 42.6$ в SC 23; $0.8 \leq VmBm \leq 14.0$ в SC 24). Диаграммы размаха, показанные на рис. 5, и характеристики распределений параметров ФП и межпланетных возмущений, представленные в табл. 2, подтверждают сделанные в разделе 3.1 выводы о поведении этих параметров в разных группах событий в циклах 23 и 24.

3.3. Анализ статистической зависимости между вариациями КЛ и параметрами межпланетных возмущений в солнечных циклах 23 и 24

В табл. 3 представлены значения коэффициентов корреляции амплитуды ФП и параметров межпланетных возмущений в группах событий

СМЕ1, СМЕ2 и СН для солнечных циклов 23 и 24. Вычисление парных коэффициентов корреляции между амплитудой ФП и параметрами СВ показало, что самая тесная корреляционная связь, ожидаемо, наблюдается с параметром $VmVm$, характеризующим мощность межпланетного возмущения. Связь амплитуды ФП с произведением скорости СВ на индукцию ММП следует из многих теоретических моделей [Parker, 1963; Крымский и др., 1981]. Проверка по z -статистике показала: (а) внутри каждой группы событий, коэффициенты корреляции между AF и $VmVm$ в циклах 23 и 24 отличаются статистически незначимо, (б) в обоих солнечных циклах корреляция параметров AF и $VmVm$ сильнее в группе СМЕ1, чем в группах СМЕ2 и СН, (в) в обоих солнечных циклах отличие этих коэффициентов в группах СМЕ2 и СН статистически незначимо.

В табл. 3 представлены также частные коэффициенты корреляции между амплитудой ФП и параметрами СВ. Использование частных коэффициентов корреляции обусловлено наличием значимой статистической связи между параметрами $Vmax$, $Vmin$, dV , dV . В зависимости от группы событий, теснота корреляционной связи между параметрами $Vmax$ и $Vmin$ в солнечных циклах 23 и 24 меняется от умеренной до значительной; для параметров dV и dV корреляция еще выше — от значительной до сильной. Проверка по z -статистике показывает, что в обоих солнечных циклах и во всех группах событий корреляция между параметрами dV и dV существенно выше, чем между параметрами $Vmin$ и $Vmax$ (кроме группы СМЕ2 в SC 23, где значения этих коэффициентов статистически неразличимы).

Что касается частных коэффициентов корреляции амплитуды ФП с параметрами СВ, то для группы СМЕ1 корреляция AF с $Vmin$ и dV сильнее в SC 23, чем в SC 24, в то время как корреляция AF с $Vmax$ и dV одинакова в обоих циклах; в 23-м цикле на величину ФП одинаково сильно влияют и скорость СВ, и величина ММП, а в 24-м цикле существенной остается только зависимость от ММП. Возможным объяснением этого является тот факт, что скорости СМЕ в 24-м цикле стали меньше, что уже было упомянуто выше, а значения поля внутри выбросов остались довольно большими. В группе СМЕ2, амплитуда ФП сильнее зависит от индукции ММП (умеренная или значительная корреляция), чем от скорости СВ (слабая или не значимая корреляция) в обоих солнечных циклах, поскольку эти события чаще медленные, и поскольку нет значительной разницы скоростей, они не создают мощной области взаимодействия. В группе СН существенная корреляция амплитуды ФП с параметром $Vmax$ в SC 23 значимо больше, чем корреляция с остальными параметрами в этом цикле и чем все корреляции в 24-м цикле. Это объяснимо, поскольку

основная часть ФП в событиях группы СН создается в области взаимодействия, эффективность которой зависит, в первую очередь, от величины поля, а далее внутри высокоскоростного потока больших значений поля уже не наблюдается.

Значительно более реальное представление о взаимосвязи переменных, по сравнению с парными коэффициентами корреляции и часто используемой простой линейной регрессией, дает метод множественной линейной регрессии. В табл. 4 представлены полученные этим методом стандартизированные коэффициенты регрессии и коэффициенты детерминации (R^2), при этом в качестве прогнозируемых переменных выступают параметры КЛ (AF , $Dmin$, $Axumax$), а в качестве предикторов — характеристики СВ ($Vmax$, $Vmin$, Vb , Vb). В таблице не приведены коэффициенты для $Axumax$ в группе СН в SC 24, так как в этом случае значение F -статистики подтверждает нулевую гипотезу об отсутствии всякой линейной регрессии. Стандартизированные коэффициенты регрессии показывают долю дисперсии прогнозируемой переменной, объясняемую данным предиктором; R^2 показывает долю дисперсии прогнозируемой переменной, объясняемую набором предикторов. Коэффициент детерминации: (а) в обоих солнечных циклах имеет максимальные значения в группе СМЕ1 и минимальные в группе СН; (б) для всех групп событий выше в SC 23, чем в SC 24; (в) в обоих солнечных циклах и во всех группах событий имеет самые маленькие значения для анизотропии КЛ, что может быть связано с малой изменчивостью этого параметра. Таким образом, зависимость параметров КЛ от характеристик межпланетной среды, а точнее сила этой зависимости и степень ее линейности, отличается в разных солнечных циклах, для разных групп событий и для разных параметров КЛ. Значения коэффициента детерминации, хотя и небольшие, но вполне достаточные для получения статистически значимых результатов регрессии, могут объясняться как сложностью и разнообразием влияния межпланетной среды на галактические КЛ, так и тем, что используемый набор предикторов не определяет полностью модуляционные возможности возмущений СВ.

Значения стандартизированных коэффициентов регрессии показывают, что в SC 23 параметры AF и $Dmin$ в группе СМЕ1 зависят сильнее всего от скорости возмущенного СВ, затем от максимальных значений ММП и от скорости спокойного СВ. Знаки коэффициентов стандартизации показывают, что чем сильнее межпланетное возмущение (больше скорость, интенсивнее поле) и чем медленнее спокойный СВ, тем эффективнее модуляция КЛ. В SC 24, амплитуда ФП в группе СМЕ1 немного сильнее зависит от $Vmax$, чем от $Vmin$, и совсем не зависит от скорости и магнит-

Таблица 4. Результаты множественной линейной регрессии: стандартизированные коэффициенты регрессии и коэффициент детерминации (R^2) в солнечных циклах 23 и 24

Группа	Цикл	Прогнозируемые переменные	Предикторы				R^2
			V_{max}	I_{max}	Bb	Vb	
СМЕ1	SC 23	AF	0.448	0.659	–	–0.202	0.6905
		D_{min}	0.443	0.668	–0.122	–0.214	0.6735
		$Ax_{u_{max}}$	–	0.768	–	–0.252	0.4425
	SC 24	AF	0.535	0.397	–	–	0.6138
		D_{min}	0.728	–	–	–	0.6608
		$Ax_{u_{max}}$	–	0.429	–	–	0.2687
СМЕ2	SC 23	AF	0.613	0.270	–0.225	–	0.5583
		D_{min}	0.646	0.328	–0.150	–	0.6800
		$Ax_{u_{max}}$	0.493	–	–	–	0.3210
	SC 24	AF	0.670	–	–0.185	–	0.5151
		D_{min}	0.523	0.275	–	–	0.3680
		$Ax_{u_{max}}$	0.519	–	–0.218	–	0.2995
СН	SC 23	AF	0.504	0.266	–	–	0.4659
		D_{min}	0.495	–	–0.238	–	0.3243
		$Ax_{u_{max}}$	0.457	–	–	–	0.1789
	SC 24	AF	0.306	0.418	–	–	0.3882
		D_{min}	0.296	–	–	–	0.2073

ного поля спокойного СВ. Характер полученных зависимостей показывает, что для спорадических событий величина модуляции КЛ в 23-м цикле часто связана с параметрами области взаимодействия выброса и спокойного СВ, в то время как в 24-м цикле она, возможно, чаще определяется телом выброса. Параметр D_{min} в группе СМЕ1 в SC 24 связан (и очень сильно) только с параметром V_{max} , что еще раз подтверждает зависимость максимальной скорости уменьшения плотности КЛ от величины магнитного поля – когда поле слабое, больших скачков вариации плотности не наблюдается. Анизотропия КЛ в группе СМЕ1 в SC 23 сильно зависит от скорости возмущенного СВ (прямая зависимость), слабее – от скорости спокойного СВ (обратная зависимость) и практически не зависит от ММП.

В группе СМЕ2: (а) амплитуда ФП в обоих солнечных циклах определяется, в основном, параметром V_{max} , но в SC 23 показывает дополнительно слабую зависимость от I_{max} и слабую отрицательную зависимость от Bb ; (б) параметр D_{min} в обоих солнечных циклах сильнее зависит от V_{max} , чем от I_{max} , и не связан с параметрами спокойного СВ. Надо заметить, что в группе СМЕ1 коэффициент детерминации для D_{min}

высокий в обоих солнечных циклах, а в группе СМЕ2 – только в SC 23.

Что касается группы СН, то значения R^2 позволяют уверенно интерпретировать только результаты, полученные для амплитуды ФП: (а) в SC 23 зависимость AF от V_{max} сильнее, чем от I_{max} ; (б) в SC 24 амплитуда ФП зависит от максимальных значений скорости СВ и индукции ММП примерно одинаково. Эти результаты частично совпадают с результатами, полученными в работе [Мелкумян и др., 2018а], где для спорадических и рекуррентных ФП проводился множественный регрессионный анализ с использованием AF , D_{min} , $Ax_{u_{max}}$ в качестве зависимых переменных и V_{max} , I_{max} в качестве предикторов. В настоящей работе, с добавлением параметров Bb и Vb в качестве предикторов и с разбиением событий по циклам СА, существенно увеличились коэффициент детерминации и стандартизированные коэффициенты регрессии для рекуррентных ФП (кроме V_{max} в SC 24). Кроме того, разбиение спорадических событий по типу солнечных источников показало существенное различие между зависимостями в группах СМЕ1 и СМЕ2: в обоих солнечных циклах ФП, связанные с волоконными выбросами, значительно сильнее зависят от V_{max} ,

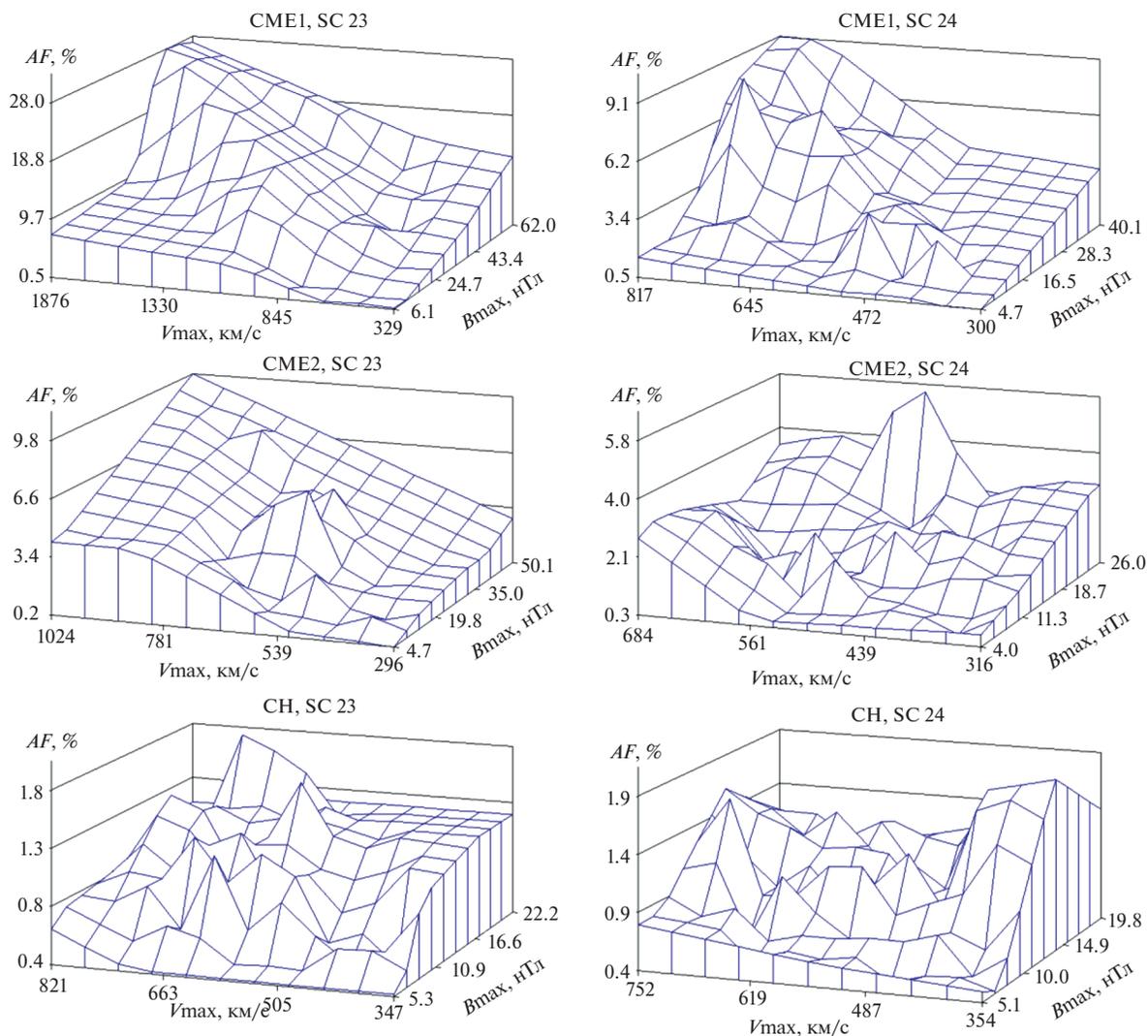


Рис. 6. Зависимость амплитуды ФП от скорости СВ и индукции ММП в солнечных циклах 23 и 24 для групп СН, СМЕ1, СМЕ2.

чем от V_{max} , в то время как для ФП, связанных с СМЕs из активных областей, эта разница не так существенна.

На рис. 6, для трех групп событий и двух солнечных циклов приведены графики зависимости амплитуды ФП от параметров B_{max} и V_{max} , полученные методом линейной интерполяции. Эти графики показывают, что: (а) линейная модель хорошо описывает зависимость AF от параметров возмущенного СВ в группе СМЕ1 в обоих солнечных циклах и в группе СМЕ2 в SC23; (б) линейная зависимость AF от параметров СВ выражена значительно хуже в группе СН в обоих солнечных циклах; (в) характер зависимости амплитуды ФП от параметров B_{max} и V_{max} существенно отличается как для различных групп событий, так и для разных солнечных циклов. В группе СМЕ1, несмотря на большую разницу в области значений

параметров СВ в SC 23 и SC 24, характер зависимости $AF(B_{max}, V_{max})$ в этих двух циклах схожий. В группе СМЕ2 различие между циклами проявляется не только в значительно большей величине разброса параметров в 23-м цикле, но и в характере зависимости: в SC 23 цикла она гораздо ближе к линейной. Хотя в SC 24 границы значений параметров СВ в группах СМЕ2 и СН почти одинаковы, графики на рис. 6 наглядно демонстрируют, что амплитуда ФП в группе СМЕ2 значительно выше и характер зависимости существенно различается между двумя циклами, то есть эффективность модуляции КЛ межпланетными возмущениями, связанными с разными типами солнечных источников, различна. Для группы СН, на графиках видно также заметное отличие зависимости амплитуды ФП от параметров B_{max} и V_{max} в 23-м и 24-м циклах, наблюдаемое

в области больших значений магнитного поля и низких значений скорости СВ. По-видимому, для этой подгруппы событий частично сказывается не только влияние самих потоков из корональных дыр, но и дополнительное влияние низкоскоростных СМЕ, “замешанных в потоке”. Как известно, случаи совместного влияния корональных выбросов массы и потоков из корональных дыр нередки (см., например, Мелкумян и др. [2022] и ссылки в ней).

4. ВЫВОДЫ

В настоящей работе для солнечных циклов SC 23 и SC 24, а также максимумов этих циклов и минимума между ними, исследуются ФП, связанные с разными типами солнечных источников: а) корональными выбросами массы из активных областей, сопровождавшимися солнечными вспышками (группа СМЕ1); б) волоконными выбросами за пределами активных областей (группа СМЕ2); в) высокоскоростными потоками из корональных дыр (группа СН). Каждое ФП описывается набором параметров, включающим: амплитуду ФП (AF), количество солнечных пятен в день начала ФП (SSN), значения индукции ММП (Bb) и скорости СВ (Vb) за час до начала ФП, максимальные в течение ФП значения: почасового уменьшения плотности КЛ (D_{min}), экваториальной анизотропии КЛ ($A_{\text{хутах}}$), индукции ММП ($B_{\text{тах}}$), скорости СВ ($V_{\text{тах}}$). Для оценки мощности межпланетных возмущений используется параметр $VmVm$; разница между характеристиками возмущенного и спокойного СВ оценивается параметрами dB и dV . Анализ ежегодных изменений параметров и статистический анализ данных, обеспеченный большим объемом используемого материала (801 событие), позволили сравнить ФП в разных группах событий в разные периоды СА. Полученные результаты могут служить надежной эмпирической базой для физической интерпретации феномена ФП. Основные выводы:

1. Число ФП, значения параметров и связи между ними зависят от фазы и цикла СА, которая проявляется по-разному для ФП, связанных с разными типами источников. Спорадические и рекуррентные ФП представлены в SC 23 (соответственно, 65 и 35%) и SC 24 (62 и 38%) примерно в одинаковых соотношениях.

2. Количество ФП в 24-м цикле, по сравнению с 23-м циклом, уменьшается вдвое в группе СМЕ1, не меняется в группе СМЕ2, и возрастает в группе СН. Ежегодное число ФП в группе СМЕ1 увеличивается с ростом числа солнечных пятен, а в группах СМЕ2 и СН от параметра SSN практически не зависит.

3. В SC 23 распределения параметров ФП имеют большие значения асимметрии и эксцесса и

“хвосты” в области высоких значений. Параметры dB и dV показывают большую разницу возмущенного и спокойного СВ в SC 23, а островершинное распределение параметра $VmVm$ – близкие мощности возмущений в SC 24.

4. Значения всех параметров ФП во всех группах событий, ожидаемо, выше в 23-м цикле, чем в 24-м (кроме D_{min} в СМЕ2 и СН). Превышение значений параметров в группе СМЕ1 над значениями в группе СМЕ2 также больше в SC 23, кроме параметра Bb , для которого оно значимо больше в SC 24.

5. Корреляции амплитуды ФП с параметром $VmVm$ сильные в группе СМЕ1 и значительные в группах СМЕ2 и СН, одинаковы для SC 23 и SC 24. Корреляции между параметрами dB и dV выше, чем между $V_{\text{тах}}$ и $B_{\text{тах}}$, в обоих циклах.

6. В группе СМЕ1, амплитуда ФП: (а) зависит сильнее от $V_{\text{тах}}$, слабее – от $B_{\text{тах}}$ и Vb в SC 23; (б) зависит сильнее от $B_{\text{тах}}$, слабее – от $V_{\text{тах}}$, и не зависит от характеристик спокойного СВ в SC 24. В этой группе, в SC 23 экваториальная анизотропия КЛ зависит от $V_{\text{тах}}$ и Vb и не зависит от величины ММП.

7. В группе СМЕ2, амплитуда ФП в обоих циклах определяется, в основном, параметром $B_{\text{тах}}$. В группе СН, в SC 23 зависимость AF от $B_{\text{тах}}$ сильнее, чем от $V_{\text{тах}}$, в то время как в SC 24 зависимость AF от $B_{\text{тах}}$ и $V_{\text{тах}}$ почти одинакова.

8. Модель множественной линейной регрессии хорошо описывает зависимость амплитуды ФП от параметров СВ для SC 23 в группах СМЕ1 и СМЕ2 и для SC 24 в группе СМЕ1.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны коллективам мировой сети станций КЛ, 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. Абуни, А.В. Белов, Н.С. Шлык поддержаны грантом Российского научного фонда № 20-72-10023.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абуни 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 аэронавигация. Т. 52. № 3. С. 313–320. 2012.
- Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке Г.В., Оленева В.А., Абунина М.А., Абуни А.А. Метод глобальной съемки

- для мировой сети нейтронных мониторов // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 3. С. 374–389. 2018.
<https://doi.org/10.7868/S0016794018030082>
- Гущина Р.Т., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Обридко 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.
<https://doi.org/10.7868/S0016794014040063>
- Крайнев М.Б., Калинин М.С., Аслам О.П.М., Нзобени М.Д., Потгитер М.С. О солнечных минимумах 20/21–24/25 и зависимости максимальной интенсивности галактических космических лучей от гелиосферных факторов // Изв. РАН. Сер. физическая. Т. 85. № 10. С. 1509–1512. 2021.
<https://doi.org/10.31857/S0367676521100197>
- Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Кривошапкин П.А., Самсонов И.С., Скрипин Г.В., Транский И.А., Чирков Н.П. Космические лучи и солнечный ветер. Новосибирск: Наука, 224 с. 1981.
- 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.
<https://doi.org/10.7868/S0016794018020025>
- Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Долгопериодные изменения количества и величины Форбуш-эффектов // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 5. С. 638–647. 2018б.
<https://doi.org/10.1134/S0016794018050103>
- 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.
<https://doi.org/10.12737/szf-51201904>
- 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. 2022.
<https://doi.org/10.31857/S0016794022030117>
- 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.
<https://doi.org/10.1007/s11207-015-0753-5>
- Belov A.V. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena / Proc. IAU Symposium. Eds. N. Gopalswamy, D.F. Webb. Cambridge: Cambridge University Press. V. 4. № S257. P. 439–450. 2008.
<https://doi.org/10.1017/S1743921309029676>
- Belov A.V., Eroshenko E.A., Oleneva V.A., Struminsky A.B., Yanke V.G. What determines the magnitude of Forbush decreases? // Adv. Space Res. V. 27. № 3. P. 625–630. 2001.
[https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(01\)00095-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00095-3)
- Burlaga L., Sittler E., Mariani F., Schwenn R. Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios, and IMP 8 observations // J. Geophys. Res. – Space. V. 86. № 8. P. 6673–6684. 1981.
<https://doi.org/10.1029/JA086iA08p06673>
- Cane H.V. Coronal mass ejections and Forbush decreases // Space Sci. Rev. V. 93. № 1–2. P. 55–77. 2000.
<https://doi.org/10.1023/A:1026532125747>
- Forbush S.E. On the effects in the cosmic-ray intensity observed during magnetic storms // Phys. Rev. V. 51. P. 1108–1109. 1937.
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.51.1108.3>
- 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. S. Hasan, R. Rutter / Astrophysics and Space Science Proceedings. Berlin, Heidelberg: Springer. P. 289–307. 2010.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-02859-5_24
- Gopalswamy N., Akiyama S., Yashiro S., Xie H., Mäkelä P., Michalek G. The mild space weather in solar cycle 24 / Proc. 14th International Ionospheric Effects Symposium on “Bridging the gap between applications and research involving ionospheric and space weather disciplines”. Alexandria, VA, 2015. P. 1–8. 2015.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1508.01603>
- 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. ID 012005. 2020.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1508.01603>
- Iucci N., Parisi M., Storini M. et al. Forbush decreases: origin and development in the interplanetary space // Nuovo Cimento C. V. 2. № 1. P. 1–52. 1979.
<https://doi.org/10.1088/0370-1572/10/1/001>
- 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. – Space. V. 110. № 2. ID A02104. 2005.
<https://doi.org/10.1029/2004JA010649>
- 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. 2016.
<https://doi.org/10.1007/s11207-016-0863-8>
- Lockwood J. A. Forbush decreases in the cosmic radiation // Space Sci. Revs. V. 12. № 5. P. 658–715. 1971.
<https://doi.org/10.1007/BF00173346>
- 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. ID e2020SW002641. 2021.
<https://doi.org/10.1029/2020SW002641>
- 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 // Mon. Not. R. Astron. Soc. V. 515. № 3. P. 4430–4444. 2022a.
<https://doi.org/10.1093/mnras/stac2017>
- Melkumyan A.A., Belov A.V., Abunina M.A., Shlyk N.S., Abunin A.A., Oleneva V.A., Yanke V.G. Development of Forbush decreases associated with coronal ejections from active regions and non-active regions // Geomagn. Aeronomy.

- V. 22. Suppl. 1. P. S40–S53. 2022b.
<https://doi.org/10.1134/S0016793222600394>
- *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.
<https://doi.org/10.1007/s11207-012-0051-4>
- *Parker E.N.* Interplanetary dynamical processes. N.Y.: Interscience Publishers, 272 p. 1963.
- *Patel B.D., Joshi B., Cho K.-S., Kim R.-S., Moon Y.-J.* Near-earth interplanetary coronal mass ejections and their association with DH type II radio bursts during solar cycles 23 and 24 // *Solar Phys.* V. 297. № 10. ID 139. 2022.
<https://doi.org/10.1007/s11207-022-02073-7>
- *Richardson I.G.* Energetic particles and corotating interaction regions in the solar wind // *Space Sci. Rev.* V. 111. № 3. P. 267–376. 2004.
<https://doi.org/10.1023/B:SPAC.0000032689.52830.3e>
- *Shi X., Fu H., Huang Z., Ma C., Xia L.* The Solar Cycle Dependence of In Situ Properties of Two Types of Interplanetary CMEs during 1999–2020 // *Astrophys. J.* V. 940. № 2. ID 103. 2022.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac9b20>
- *Thakur N.* Smaller Forbush decreases in solar cycle 24: Effect of the weak CME field strength? / American Geophysical Union, Fall Meeting 2015. ID SH23A-2428. 2015.
- *Yermolaev Yu.I., Lodkina I.G., Khokhlachev A.A. et al.* Drop of solar wind at the end of the 20th century // *J. Geophys. Res. – Space.* V. 126. № 9. ID e29618. 2021.
<https://doi.org/10.1029/2021JA029618>
- *Yermolaev Yu.I., Lodkina I.G., Khokhlachev A.A. et al.* Dynamics of large-scale solar-wind streams obtained by the Double Superposed Epoch Analysis: 5. Influence of the solar activity decrease // *Universe.* V. 8. № 9. ID 472. 2022.
<https://doi.org/10.3390/universe8090472>