

УДК 524.1-352, 523.985, 523.985.4

## ГЕОЭФФЕКТИВНОСТЬ СПОРАДИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В 24-м СОЛНЕЧНОМ ЦИКЛЕ

© 2023 г. А. В. Белов<sup>1</sup>, Е. А. Белова<sup>1</sup> \*, Н. С. Шлык<sup>1</sup>, М. А. Абунина<sup>1</sup> \*\*, А. А. Абунин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троцк, Россия

\*e-mail: lbelova@izmiran.ru

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

Поступила в редакцию 10.03.2023 г.

После доработки 27.03.2023 г.

Принята к публикации 28.03.2023 г.

Обсуждены особенности 24-го цикла солнечной активности, проявившиеся в вариациях космических лучей, характеристиках солнечных вспышек, протонных событий, корональных выбросов массы, а также уровне геомагнитной активности. Показано, что по числу солнечных пятен и других проявлений солнечной активности 24-й цикл оказался самым скромным за последние 100 лет наблюдений. Описано значительное снижение геоэффективности различных солнечных событий, проявившееся в меньшем количестве и величинах зарегистрированных на Земле Форбуш-эффектов, возрастаний потоков протонов и электронов разных энергий и геомагнитных бурь.

DOI: 10.31857/S0016794023600291, EDN: OUBOKI

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Проводив 23-й цикл солнечной активности (СА), мы немало удивлялись его умеренности, но 24-й цикл по всем параметрам превзошел предшественника. Он реализовался как цикл низкой величины, пятнообразовательная и вспышечная активность которого были существенно ниже всех предыдущих солнечных циклов (СЦ) космической эры, и протекал в условиях, когда фоновые значения общего магнитного поля Солнца уменьшились более чем в два раза, что привело к полной перестройке физических условий на Солнце, и, как следствие, в гелиосфере [Ишков, 2022]. Чем еще удивил закончившийся цикл, чем именно он отличался от других и как он может изменить наши взгляды?

Ряд авторов обращает внимание на значительное изменение коронального магнитного поля Солнца: например, в работе Chifu et al. [2022] показано, что во время 24 СЦ основной вклад в общий поток магнитного поля вносит поток, поступающий от структур, отличных от солнечных пятен на широтах от  $-30^\circ$  до  $+30^\circ$ , и, кроме того, большее число пятен было зарегистрировано в северном полушарии, но больший магнитный поток — в южном. Подобные выводы о северо-южной асимметрии распределения солнечных пятен, отличающихся от предыдущих циклов СА, получены также и в работе Chandra et al. [2022]. Безродных и др. [2019] показали, что максималь-

ное (113) и суммарное (545) число солнечных пятен в 24-м цикле уменьшилось соответственно на 45 и 50% относительно средних величин для последних семи циклов.

Ослабленная СА отражается в ослаблении таких параметров гелиосферы, как величина межпланетного магнитного поля (ММП), температура, плотность, скорость солнечного ветра (СВ) и, следовательно, общее давление, на величины от 20 до 40% [Yermolaev et al., 2022]. Ослабление гелиосферы в 24-м цикле привело и к изменению свойств распространения корональных выбросов массы (КВМ) и, следовательно, повлияло на космическую погоду, в частности, заметно сократилось количество интенсивных геомагнитных бурь с  $Dst_{min} \leq -100$  нТл [Zhang et al., 2021]. Manu et al. [2022] показали, что средняя интенсивность геомагнитной активности (ГА) в 24-м цикле по сравнению с 23-м, уменьшается больше всего в низких широтах, а на средних и в высоких широтах снижение интенсивности менее выражено.

Измененное состояние гелиосферы отразилось и на распространении галактических космических лучей (КЛ). Потоки галактических КЛ с энергией  $< 1$  ГэВ/нуклон в 2008–2009 гг. были самыми высокими по сравнению с минимумами пяти предыдущих СЦ [Безродных и др., 2019], а долговременная модуляция КЛ гелиосферным магнитным полем оказалась самой слабой за все время работы нейтронных мониторов [Янке и др.,

2021]. В работе Калинина и др. [2017] установлено, что определяющим фактором повышенной интенсивности галактических КЛ в минимуме 24 СЦ является аномальное понижение напряженности гелиосферного магнитного поля в этот период, при дополнительном влиянии скорости СВ и угла наклона гелиосферного токового слоя. В работе Мелкумян и др. [2018] обращается внимание на то, что в 24-м цикле Форбуш-эффектов (ФЭ – изменений плотности и анизотропии потока галактических КЛ) меньше, и они, в целом, слабее, чем в предыдущих циклах. Григорьев и др. [2022] показали, что в 24-м цикле СА наблюдался более мягкий энергетический спектр ФЭ, и пришли к выводу о том, что такое смягчение спектра может свидетельствовать о доминирующей роли диффузионного механизма формирования ФЭ и повышенной турбулентности ММП.

В работе Безродных и др. [2019] было отмечено значительное снижение в 24 СЦ потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли. Например, в 2009 г. на геостационарной орбите зарегистрированы минимальные (с 1986 г.) величины потоков электронов с энергией  $>2$  МэВ (по данным спутников GOES).

Высокоэнергичные ( $\geq 500$  МэВ) солнечные протонные события (СПС) также регистрировались значительно реже в рассматриваемом периоде. Поскольку эффективность ускорения частиц зависит от напряженности магнитного поля, следовательно, уменьшение последнего приводит к меньшему эффективному ускорению, и частицы не достигают высоких энергий [Zhang et al., 2021]. Число СПС с энергией  $>10$  МэВ уменьшилось незначительно, тогда как число наземных возрастных при сравнении циклов 23 и 24 снизилось в 8 раз [Базилевская и др., 2021]. СПС разных энергий в 24-м цикле СА медленнее развивались и имели меньшую продолжительность в сравнении с предыдущим циклом [Pandey et al., 2022].

Общее количество КВМ увеличилось в 24 СЦ относительно цикла 23, хотя быстрых и широких КВМ стало меньше, и для определенных значений начальной скорости КВМ оказались значительно шире (см. [Zhang et al., 2021]). Также группа авторов Patel et al. [2022] указывают на резкое снижение (на 56%) скоростей КВМ в 24 СЦ по сравнению с предыдущим циклом, и, кроме того, описывают почти полное отсутствие быстрых событий с транзитным временем в 20–40 ч. В работе Shi et al. [2022] было показано, что количество КВМ, не связанных с солнечными вспышками (волоконные эрупции), почти не изменилось в 23–24 циклах СА, а вот “вспышечных” событий стало меньше. Известно, что частота возникновения КВМ коррелирует с числом солнечных пятен на длительных промежутках времени, но наклон линии регрессии значительно отличается в 24-м цикле

[Zhang et al., 2021]. Lamy et al. [2019] указывают на то, что частота генерации КВМ в северном полушарии оказалась значительно больше, чем предсказывает временная вариация числа солнечных пятен.

Солнечные корональные дыры (КД) и связанные с ними высокоскоростные потоки СВ также способны оказывать воздействие на околоземное космическое пространство. Andreeva et al. [2021] описывают наблюдаемую на протяжении 24-го цикла асимметрию площадей полярных КД в северной и южной полусферах, а также отмечают, что площади неполярных КД меняются квазисинхронно с пятенной активностью Солнца. Najra et al. [2022] показали, что в 24 СЦ Земля подвергалась воздействию коротящих областей взаимодействия (созданных высокоскоростными потоками плазмы из КД) в 2.6 раза чаще, чем воздействию турбулентных областей перед телом КВМ. А в работе Yermolaev et al. [2022] показано, что в 24-м цикле доля геомагнитных бурь, инициированных воздействием коротящих областей взаимодействия, увеличилась с 17 до 30% в сравнении с предыдущими циклами.

Несмотря на существование вышеупомянутых исследований, еще далеко не все особенности 24 СЦ объяснены и изучены, поскольку процессы, происходящие в гелиосфере, очень многогранны и взаимосвязаны. Цель данной работы – оценить геоэффективность солнечных событий 24-го цикла, используя доступные наземные и спутниковые данные о солнечных вспышках, протонных возрастаниях, КВМ, потоках релятивистских электронов, вариациях КЛ и изменении уровня ГА.

## 2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В работе использованы данные по суточному флюенсу (суммарный поток в сутки) релятивистских магнитосферных электронов с энергиями  $>2$  МэВ со спутников GOES (<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/particle/>). Информация о параметрах СВ взята из базы данных OMNI ([ftp://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/high\\_res\\_omni/](ftp://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/high_res_omni/)), информация о геомагнитной активности ( $Kp$ - и  $Ap$ -индексы) из <ftp://ftp.gfz-potsdam.de/pub/home/obs/kp-ap/wdc> [Matzka et al., 2021]. Данные по ФЭ (вариации плотности и анизотропии КЛ для частиц с жесткостью 10 ГВ, рассчитанные методом глобальной съемки [Белов и др., 2018]) включены в базу данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений (FEID – *Forbush Effects and Interplanetary Disturbances*, <http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html>), созданную в ИЗМИРАН. В нашей работе рассматриваются часовые значения всех основных параметров СВ, ММП и КЛ, а для индексов геомагнитной активности используются трехчасовые интервалы. Данные по солнечным вспышкам и СПС собираются в базе данных рентгенов-

**Таблица 1.** Границы солнечных циклов

| Циклы СА | Дата начала | Дата окончания |
|----------|-------------|----------------|
| 17 цикл  | 1933.09.01  | 1944.01.31     |
| 18 цикл  | 1944.02.01  | 1954.04.30     |
| 19 цикл  | 1954.05.01  | 1964.10.31     |
| 20 цикл  | 1964.11.01  | 1976.06.30     |
| 21 цикл  | 1976.07.01  | 1986.09.30     |
| 22 цикл  | 1986.10.01  | 1996.04.30     |
| 23 цикл  | 1996.05.01  | 2008.12.31     |
| 24 цикл  | 2009.01.01  | 2019.12.31     |

ских вспышек и протонных возрастаний [Belov et al., 2005, 2007; Белов, 2017]. Возрастания солнечных КЛ выбраны на основе измерений потоков протонов с энергией  $>10$  и  $>100$  МэВ спутниками IMP-8 и GOES ([ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR\\_DATA/SOLAR\\_FLARES/XRAY\\_FLARES](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_FLARES/XRAY_FLARES)). Эта база данных ежедневно обновляется (<http://www.swpc.noaa.gov/ftppdir/lists/xray>, <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/events/>) и в настоящее время содержит более 82000 рентгеновских вспышек и более 1400 протонных событий с сентября 1975 г. Границы СЦ определены в соответствии с данными SIDC (<https://www.sidc.be/silso/datafiles>) и приведены в табл. 1.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

#### 3.1. Межпланетное магнитное поле и солнечный ветер

В таблице 2 приведены основные характеристики межпланетной среды с 20-го по 24-й циклы, поскольку непрерывные наблюдения скорости СВ и ММП начались с 1964 г. Видно, что спокойный характер 24-го цикла проявляется в средних величинах ММП  $B_{\text{mean}} = 5.27 \pm 0.01$  нТл и скорости СВ  $V_{\text{mean}} = 412.79 \pm 0.30$  км/с. Среднее значение ММП в 24-м цикле — минимальное по сравнению с другими циклами, так, например, оно на 27% меньше, чем в 21-м. А значение средней скорости СВ хоть и является наименьшим, но различие с другими циклами не столь значительное: от 4.2 до 9.5%.

**Таблица 2.** Основные характеристики ММП и СВ

| Параметр/Цикл СА  | 20                | 21                | 22                | 23                | 24                |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $B_{\text{max}}$  | 44.8              | 54.8              | 40.7              | 62.0              | 40.1              |
| $B_{\text{mean}}$ | $6.18 \pm 0.01$   | $7.19 \pm 0.01$   | $6.86 \pm 0.02$   | $6.20 \pm 0.01$   | $5.27 \pm 0.01$   |
| $V_{\text{max}}$  | 951               | 1021              | 1090              | 1876              | 907               |
| $V_{\text{mean}}$ | $455.68 \pm 0.43$ | $430.18 \pm 0.39$ | $445.92 \pm 0.54$ | $443.27 \pm 0.32$ | $412.79 \pm 0.30$ |

#### 3.2. Солнечные вспышки и протонные события

С 1976 г. рентгеновские вспышки практически бесперебойно регистрируются спутниками серии GOES. За это же время выделены околоземные возрастания потока протонов (или СПС), включая и самые слабые. В итоге имеются однородные данные за четыре полных солнечных цикла. Результаты приведены в табл. 3.

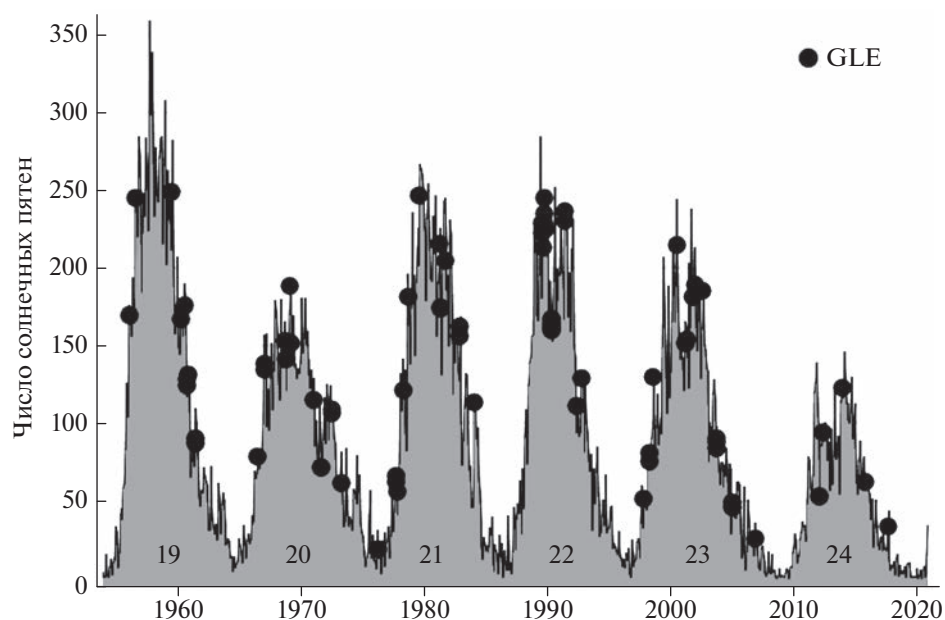
Можно видеть, что вспышек амплитудой  $\geq C1$  в 24-м цикле было в 1.4–1.8 раза меньше, чем в предыдущих циклах СА, а вспышек  $\geq M1$  — в 2–3 раза. Следует отметить, что в 21–23 СЦ максимальная мощность вспышки ограничивалась порогом детектора, а в 24-м зарегистрирована реальная величина максимума, который меньше порога детектора и меньше максимальных значений в предыдущих циклах.

Если говорить о протонных событиях, то их, как и вспышек, стало меньше в 2.5–3.2 раза. Но все средние и большие вспышки, можно сказать, более рационально “расходовались”, т.е. чаще приводили к регистрации СПС. Так, если в 21–22 СЦ, в среднем, одно СПС ( $>10$  МэВ,  $\geq 10$  pfu) приходилось на  $\sim 2$  вспышки с мощностью  $\geq X1$ , то в 23–24 СЦ количества таких событий сильно сблизились (в 23-м цикле зарегистрировано 108 вспышек  $\geq X1$  и 120 СПС, а в 24-м цикле — 49 вспышек  $\geq X1$  и 41 СПС). Естественно ожидать, что 24-й цикл будет сильнее отличаться от 21–22 циклов, чем от переходного 23-го цикла.

В 24-м цикле СА зарегистрировано всего 5 наземных возрастаний солнечных КЛ (GLE) — приблизительно в 3 раза меньше, чем в четырех последних циклах (рис. 1). Отметим, что под термином GLE мы понимаем следующее: возрастание КЛ было зарегистрировано либо на нескольких нейтронных мониторах на уровне моря, либо как минимум на одном нейтронном мониторе (на уровне моря) и спутниковом детекторе. Поэтому в нашу базу данных были включены и совсем маленькие возрастания, не учитываемые многими другими авторами.

#### 3.3. Геомагнитные бури и Форбуш-эффекты

В Форбуш-эффектах, т.е. в вариациях КЛ (как правило, галактических), обусловленных КВМ и высокоскоростными потоками из КД [Forbush, 1938; Cane, 2000; Lockwood, 1971; Belov, 2009], хо-



**Рис. 1.** Моменты всех наземных возрастных солнечных космических лучей (GLE) на фоне изменений чисел солнечных пятен.

рошо проявляются спорадические и рекуррентные солнечные явления. Поэтому их удобно использовать для сравнения солнечной активности в различных циклах. Точнее, в шести последних цик-

лах, поскольку ФЭ выделены и собраны в базу данных FEID с 1957 г. Количества различных ФЭ в 19–24-м циклах СА вместе с количеством геомагнитных бурь разной величины сведены в табл. 4.

**Таблица 3.** Характеристики солнечных вспышек и протонных возрастных в четырех последних циклах СА

| Параметр/Цикл СА                                           | 21               | 22                 | 23                  | 24                 |
|------------------------------------------------------------|------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| Количество вспышек $\geq C1$                               | 16410            | 14600              | 12498               | 8659               |
| Количество вспышек $\geq M1$                               | 2340             | 2172               | 1396                | 800                |
| Количество вспышек $\geq X1$                               | 166              | 153                | 108                 | 49                 |
| Количество вспышек $\geq X5$                               | 19               | 23                 | 17                  | 4                  |
| Средняя мощность вспышки, $10^{-6}$ Вт/м <sup>2</sup>      | $8.4 \pm 0.29$   | $9.4 \pm 0.39$     | $7.9 \pm 0.44$      | $5.8 \pm 0.25$     |
| Максимальная мощность вспышки, $10^{-3}$ Вт/м <sup>2</sup> | 1.5              | 2.0                | 2.8                 | 0.93               |
| Количество СПС $>10$ МэВ, $>0.1$ pfu                       | 468              | 431                | 371                 | 143                |
| Количество СПС $>10$ МэВ, $>10$ pfu                        | 80               | 75                 | 120                 | 41                 |
| Среднее значение потока СПС $>10$ МэВ, pfu                 | $34.50 \pm 7.94$ | $121.09 \pm 34.99$ | $303.94 \pm 105.45$ | $113.19 \pm 44.99$ |
| Максимальный поток СПС $>10$ МэВ, pfu                      | 2250             | 10000              | 31700               | 5000               |
| Количество СПС $>100$ МэВ, $>0.02$ pfu                     | 215              | 213                | 180                 | 79                 |
| Количество СПС $>100$ МэВ, $>1$ pfu                        | 38               | 35                 | 45                  | 13                 |
| Среднее значение потока СПС $>100$ МэВ, pfu                | $2.48 \pm 0.65$  | $12.91 \pm 4.29$   | $16.90 \pm 5.95$    | $2.61 \pm 1.25$    |
| Максимальный поток СПС $>100$ МэВ, pfu                     | 75               | 559                | 650                 | 70                 |
| Количество GLE                                             | 12               | 15                 | 16                  | 5                  |
| Среднее значение потока GLE $>100$ МэВ, pfu                | $33.76 \pm 7.04$ | $144.31 \pm 45.39$ | $149.52 \pm 51.21$  | $21.22 \pm 12.14$  |
| Максимальный поток GLE $>100$ МэВ, pfu                     | 75               | 559                | 650                 | 68                 |

*Примечание.* Строка “Количество СПС  $>10$  МэВ,  $>0.1$  pfu” (и подобные) означает, что приведено количество возрастных потока протонов с энергиями  $>10$  МэВ, в которых максимальный поток (по средним 5-минутным значениям) частиц превышал значение 0.1 pfu.

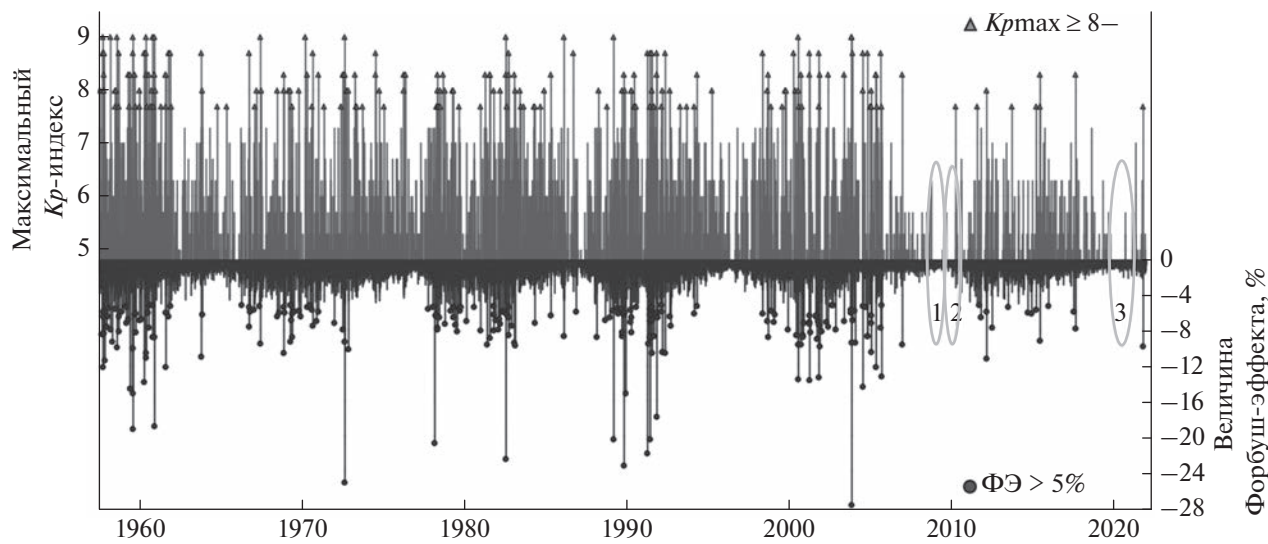


Рис. 2. Соотношение геомагнитных бурь и Форбуш-эффектов.

На рис. 2 приведено соотношение количества и величины геомагнитных бурь и ФЭ с 19-го по 24-й циклы. Видно, как явно выделяется 24-й цикл – менее выражены и геомагнитные бури, и Форбуш-эффекты по сравнению с предыдущими пятью циклами. Впервые появляются длительные (до 7 мес.) спокойные временные отрезки в начале и в конце цикла, когда магнитные бури и большие ФЭ не регистрировались совсем.

В 24 СЦ впервые наблюдается непривычно малое количество геомагнитных бурь: всего 283, и 123 из них – это бури с  $Kp_{max} = 5$ –. Заметим, что по количеству больших и очень больших бурь

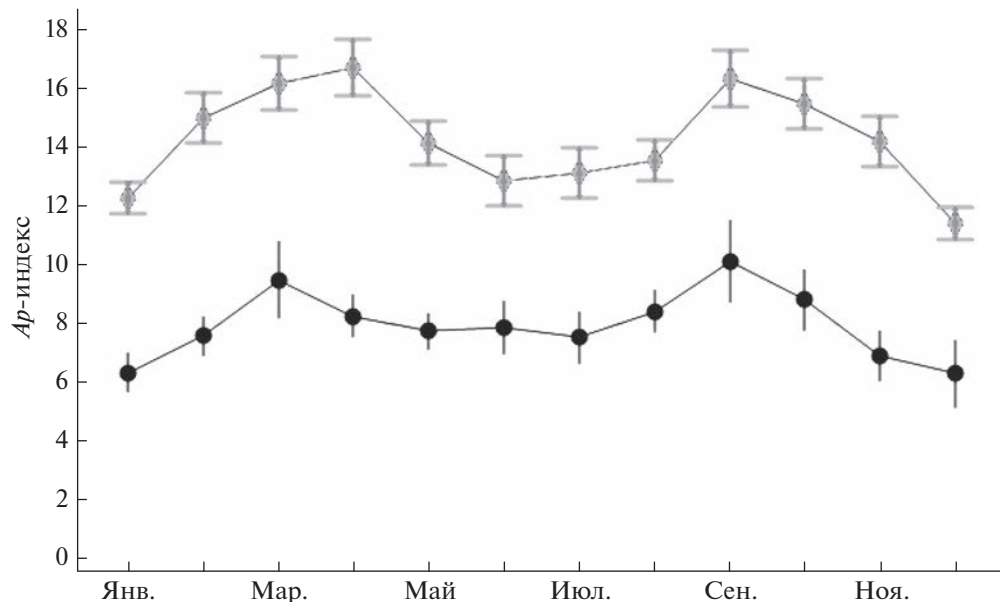
24-й цикл оказался меньше своих предшественников в 3–4 раза, а исключительно больших геомагнитных бурь с  $Kp_{max} = 9$  в нем и вовсе не случилось. По-прежнему, в этом отношении сильно выделяется 19-й цикл. Зато по количеству спокойных дней ( $Kp_{max} = 0$ ) 24 СЦ ставит рекорд, здесь 11 “нулевых” дней, и главную лепту в эту цифру внес тишайший 2009 г., когда было 6 абсолютно спокойных дней.

На рис. 2 выделены периоды отсутствия геомагнитных бурь (отмечены эллипсами с номерами 1, 2 и 3). Период 1 продлился 8 мес.: с 12 октября 2008 г. по 23 июня 2009 г., если не считать один

Таблица 4. Количество геомагнитных бурь и Форбуш-эффектов в шести последних солнечных циклах

| Цикл СА                                       | 19     | 20     | 21     | 22     | 23     | 24     |
|-----------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Всего геомагнитных бурь                       | 621    | 499    | 588    | 538    | 487    | 283    |
| Малые бури ( $Kp_{max} = 5$ )                 | 317    | 294    | 308    | 283    | 272    | 177    |
| Умеренные бури ( $Kp_{max} = 6$ )             | 168    | 119    | 173    | 152    | 119    | 82     |
| Большие бури ( $Kp_{max} = 7$ )               | 72     | 49     | 73     | 72     | 60     | 17     |
| Очень большие бури ( $Kp_{max} = 8, 9$ )      | 57     | 34     | 33     | 30     | 33     | 7      |
| Исключительно большие бури ( $Kp_{max} = 9$ ) | 7      | 3      | 2      | 1      | 3      | 0      |
| Количество дней с $Kp_{max} = 0$              | 1      | 0      | 0      | 0      | 6      | 11     |
| ФЭ > 1%                                       | 435    | 631    | 593    | 586    | 635    | 505    |
| ФЭ > 3%                                       | 71     | 102    | 94     | 123    | 110    | 46     |
| ФЭ > 5%                                       | 35     | 23     | 35     | 38     | 50     | 13     |
| ФЭ > 10%                                      | 10     | 2      | 2      | 7      | 7      | 1      |
| Среднее значение $A_p$ -индекса               | 15.67  | 12.84  | 14.03  | 15.59  | 11.87  | 7.97   |
| Среднее значение $Dst$ -индекса, нТл          | –33.42 | –25.03 | –33.24 | –36.58 | –28.57 | –19.34 |

Примечание. Данные по 19 СЦ несколько занижены, поскольку ФЭ и уровень ГА анализируются не с начала цикла (01.05.1954), а только с 1957 г.



**Рис. 3.** Сезонная зависимость среднемесячного  $A_p$ -индекса геомагнитной активности в 1932–2008 гг. (светло-серая кривая) и в последнем цикле (черная кривая). Вертикальными линиями показаны ошибки средних значений исследуемого параметра.

день 13 марта с одним трехчасовым интервалом малой магнитной бури ( $K_{\text{рmax}} = 5-$ ). Период 2 продолжался 7 мес.: с 31 августа 2009 г. по 4 апреля 2010 г. А период 3 ставит рекорд в 10 месяцев, продолжаясь с 27 октября 2019 г. по 27 августа 2020 г., если не считать 20 апреля 2020 г., когда был зарегистрирован один интервал с  $K_{\text{рmax}} = 5-$ . В истории и ранее случались периоды без бурь, но не такие длинные.

Известна также сезонная зависимость ГА (см., например, [Cliver et al., 2002; Marques de Souza Franco et al., 2021 и ссылки в них]), связанная с наклоном оси Земли по отношению к силовым линиям ММП. Обычно весной и осенью ГА выше, чем зимой и летом. Поскольку имеются данные по ГА с 1932 г., можно сравнить средние месячные значения  $A_p$ -индекса геомагнитной активности 24-го цикла с семью его предшественниками (рис. 3). Хорошо видно, что 17–23-й циклы оказались более геоэффективными, чем 24-й цикл СА. Настолько, что даже максимальные мартовские и сентябрьские значения  $A_p$  в 24-м цикле оказались ниже минимальных усредненных значений за предыдущие семь циклов СА.

В 24-м цикле СА также значительно снизилось количество больших ФЭ: например, ФЭ величиной  $>5\%$  оказалось всего 13, явно меньше, чем в 20–23-м циклах СА (см. табл. 4 и рис. 2). Самый большой ФЭ наблюдался 8 марта 2012 г., его амплитуда составила 11.2% (для сравнения: в 23-м цикле был зарегистрирован самый большой в истории наблюдений ФЭ (28%), а единственный сравнимый с ним по величине ФЭ (25%) был в далеком 1972 г.).

### 3.4. Корональные выбросы массы

Поскольку мы говорим о больших Форбуш-эффектах, которые обусловлены именно выбросами солнечного вещества, то изменения их количества должны быть связаны с количеством или какими-то другими свойствами КВМ. В табл. 5 приведены некоторые характеристики КВМ за последние два цикла СА.

Видно, что общее количество КВМ в 24-м цикле СА увеличилось, однако их средние и максимальные начальные скорости, стали меньше по сравнению с 23 СЦ. При этом также возросло количество зарегистрированных частичных гало, а полных гало стало несколько меньше. Подобные выводы были также получены в работах Zhang et al. [2021], Patel et al. [2022].

По-видимому, снижение скоростей КВМ привело к тому, что в 24-м цикле они стали менее эффективно модулировать КЛ, поскольку величина зарегистрированных ФЭ также заметно снизилась, как отмечалось ранее.

### 3.5. Анизотропия космических лучей

Мы рассмотрели проявления 24-го цикла в протонных вспышках, геомагнитных бурях и Форбуш-эффектах. Но даже такая “консервативная” характеристика КЛ, как анизотропия, проявилась заметным снижением в последнем цикле. В таблице 6 приведены значения экваториальной составляющей первой гармоники анизотропии КЛ ( $A_{\text{ху}}$ ) в исследуемые периоды. Поскольку для расчетов использовались часовые значения (и для

**Таблица 5.** Количество и характеристики КВМ за 23–24 циклы СА

| Параметр/Цикл СА                                         | 23              | 24             |
|----------------------------------------------------------|-----------------|----------------|
| Общее количество КВМ                                     | 13970           | 16108          |
| Средняя начальная скорость КВМ, км/с                     | $425 \pm 2.3$   | $340 \pm 1.6$  |
| Количество гало КВМ                                      | 396             | 325            |
| Средняя начальная скорость гало КВМ, км/с                | $1040 \pm 29.6$ | $906 \pm 26.0$ |
| Максимальная начальная скорость гало КВМ, км/с           | 3387            | 3163           |
| Количество частичных гало КВМ (ширина $>120^\circ$ )     | 843             | 1052           |
| Средняя начальная скорость частичных гало КВМ, км/с      | $624 \pm 13.0$  | $513 \pm 8.1$  |
| Максимальная начальная скорость частичных гало КВМ, км/с | 2505            | 2039           |

**Таблица 6.** Максимальные и средние значения анизотропии КЛ в разные циклы СА

| Величина/Циклы СА        | 19   | 20   | 21   | 22   | 23   | 24   |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|
| $A_{xy} \max$ , %        | 5.12 | 8.17 | 9.67 | 8.43 | 9.91 | 3.45 |
| $A_{xy} \text{mean}$ , % | 0.62 | 0.62 | 0.61 | 0.62 | 0.60 | 0.55 |

*Примечание.* Данные за 19 цикл неточные, т.к. цикл начался 1 мая 1954 г., а база данных FEID содержит данные с июля 1957 г.

**Таблица 7.** Максимальные и средние часовые значения потока релятивистских электронов с энергиями  $>2$  МэВ на геостационарной орбите по данным спутников серии GOES

| Величина/Циклы СА                                                      | 22                  | 23                 | 24                  |
|------------------------------------------------------------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| $E \max$ , частиц $\text{см}^{-2} \text{ср}^{-1} \text{ч}^{-1}$        | 611083              | 301417             | 169333              |
| $E \text{mean}$ , частиц $\text{см}^{-2} \text{ср}^{-1} \text{ч}^{-1}$ | $1856.41 \pm 28.79$ | $2120.45 \pm 25.4$ | $1484.87 \pm 16.36$ |

*Примечание.* Данные за 22 цикл неполные, т.к. наблюдение за электронами началось с 1987 г.

каждого цикла получается около 100 тыс. ч), то ошибка средних значений не превышает 0.002%, поэтому не приводится. Из таблицы 6 видно, что в 19–23-м циклах СА средние величины анизотропии сильно не менялись (0.60–0.62%), а в 24-м цикле значение практически на 10% меньше. При этом максимальное зарегистрированное значение экваториальной анизотропии КЛ в 24 СЦ примерно в 2.4–2.8 раз меньше, чем в предыдущие циклы.

### 3.6. Высокоэнергичные магнитосферные электроны

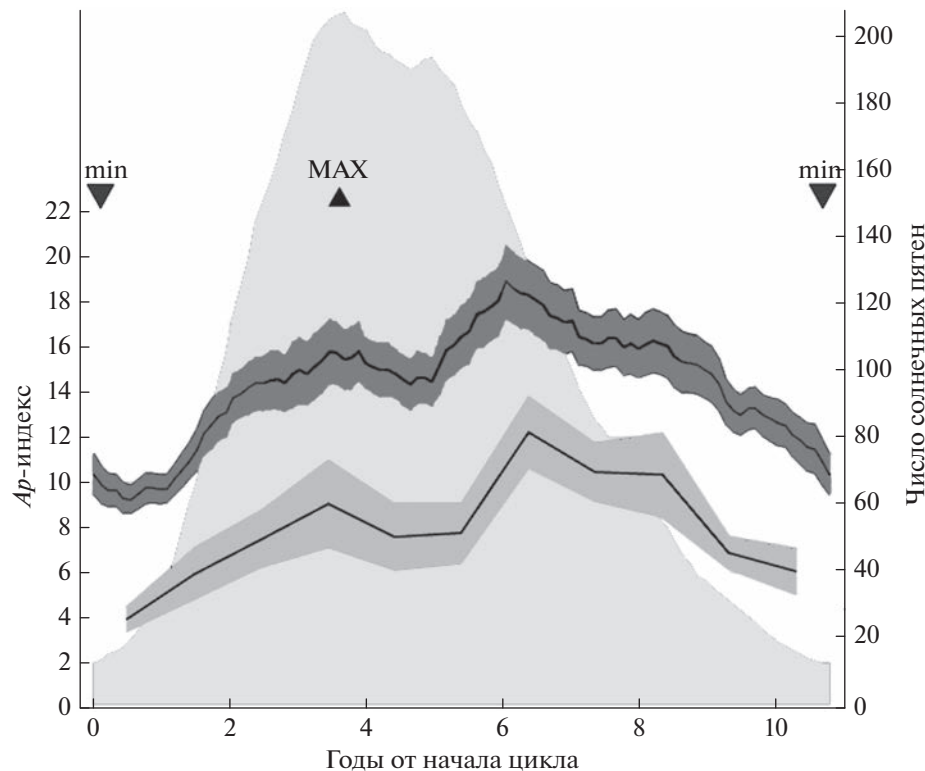
Говоря об эффективности СА нельзя обойти обсуждение высокоэнергичных магнитосферных электронов, которые существенно влияют на спутниковую электронику [Baker, 2000; Belov et al., 2004; Pilipenko et al., 2006; Baker et al., 2018]. Максимальное зарегистрированное значение потока высокоэнергичных ( $>2$  МэВ) магнитосферных электронов ( $E$ ) в 24 СЦ примерно в 2 раза ниже, чем в 23 СЦ, и в 4 раза ниже, чем в 22 СЦ (см. табл. 7). Различия в средних значениях потока не такие явные, хотя и здесь в 24-м цикле наблюдались наименьшие величины. Можно заметить, что сравнение средних значений потока электронов

является не вполне корректным, так как измерения велись в разные периоды разными детекторами с отличающимися нижними порогами чувствительности, это влияло на регистрацию слабых потоков, и, следовательно, на средние значения.

### 3.7. Усредненный и 24-й солнечные циклы

Мы решили сравнить 24-й цикл СА и усредненный цикл за период 17–23 СЦ. Для этого построили усредненный (по месяцам) солнечный цикл по числам пятен с усредненной (также по месяцам) ГА и сравнили с аналогичной кривой ГА 24-го цикла (рис. 4). В числах пятен явно видны два максимума: обычно первый максимум больше, чем второй. Отметим, что в 24-м цикле наоборот, второй максимум был выше первого. В поведении ГА также видны два широких максимума: первый примерно совпадает с максимумом чисел солнечных пятен, а второй приходится, в основном, на спад, когда заметно усиливается влияние потоков из КД. Также видно, что кривая 24-го цикла имеет много меньшие значения, но поведение ГА внутри цикла развивается по традиции циклов-предшественников.





**Рис. 4.** Среднемесячные значения  $A_p$ -индекса (левая шкала) на фоне среднемесячных значений числа солнечных пятен (правая шкала) типичного 11-летнего цикла солнечной активности (17–23-й циклы, усредненные по фазам). Толстая темная серая кривая — среднемесячные значения  $A_p$  ( $\pm 2\sigma$ , по годам), усредненные за 17–23-й циклы, толстая светлая серая кривая — то же за 24-й цикл (с 27-дневным скользящим усреднением). На горизонтальной шкале приведены порядковые номера года СЦ.

### 3.8. Спокойные 2009 и 2019 гг.

Возможно, самый удивительный год последних лет наблюдений относится к 24-му циклу — это 2009, который, по-видимому, можно считать самым спокойным в истории изучения солнечно-земных связей. Весь 2009 г. на Солнце не было значительных вспышек, даже слабых вспышек было мало. Самые большие за год рентгеновские вспышки были зарегистрированы в самом конце года в декабре, но и они не превысили уровень C8. Практически не было больших и/или геоэффективных выбросов солнечного вещества. Соответственно, отсутствовали и значительные Форбуш-эффекты. Максимальная величина  $\Phi\Delta$ , зарегистрированного в 2009 г., составила всего 1.3% (для частиц с жесткостью 10 ГВ), а среднее значение для всех  $\Phi\Delta$  — 0.63%.

Никогда ранее у Земли не было такого медленного и спокойного солнечного ветра. Средние за 2009 г. значения скорости СВ (364 км/с) и напряженности межпланетного магнитного поля (3.9 нТл) — самые низкие за все время межпланетных наблюдений. Самое низкое среднемесячное значение напряженности ММП (3.52 нТл) пришлось на апрель 2009 г.

Еще удивительнее сведения о геомагнитной активности в 2009 г., точнее сказать, о ее отсутствии. 2009 г. полностью изменил наши представления о том, насколько спокойным может быть магнитное поле Земли. Во все без исключения месяцы (от января до декабря) были зарегистрированы исторические минимумы среднемесячных  $A_p$ -индексов для соответствующих месяцев. Несколько раз за год изменялся абсолютный минимум среднемесячных значений, пока, наконец, не достиг значения 1.9 (в декабре). Мало сказать, что такие низкие  $A_p$  и  $K_p$ -индексы не наблюдались ранее, трудно было предположить, что такое спокойное геомагнитное поле вообще возможно. Долгое время годом с самым низким среднегодовым  $A_p$ -индексом 7.25 был 1934 г., но в 2008 г. минимум опустился до 6.93, а в 2009 г. еще намного ниже — до 3.92. За весь 2009 г. зарегистрированы только четыре геомагнитные бури (при обычной норме около 50), да и те малые и кратковременные.

В 2019 г. (минимум 24–25 СЦ) было большее количество дней без пятен, всего 281 день (77%), тогда как в 2009 г. было 260 дней (71%). Среднее значение  $A_p$  было 6.06, что значительно больше, чем в 2009 г., но меньше, чем во все остальные го-



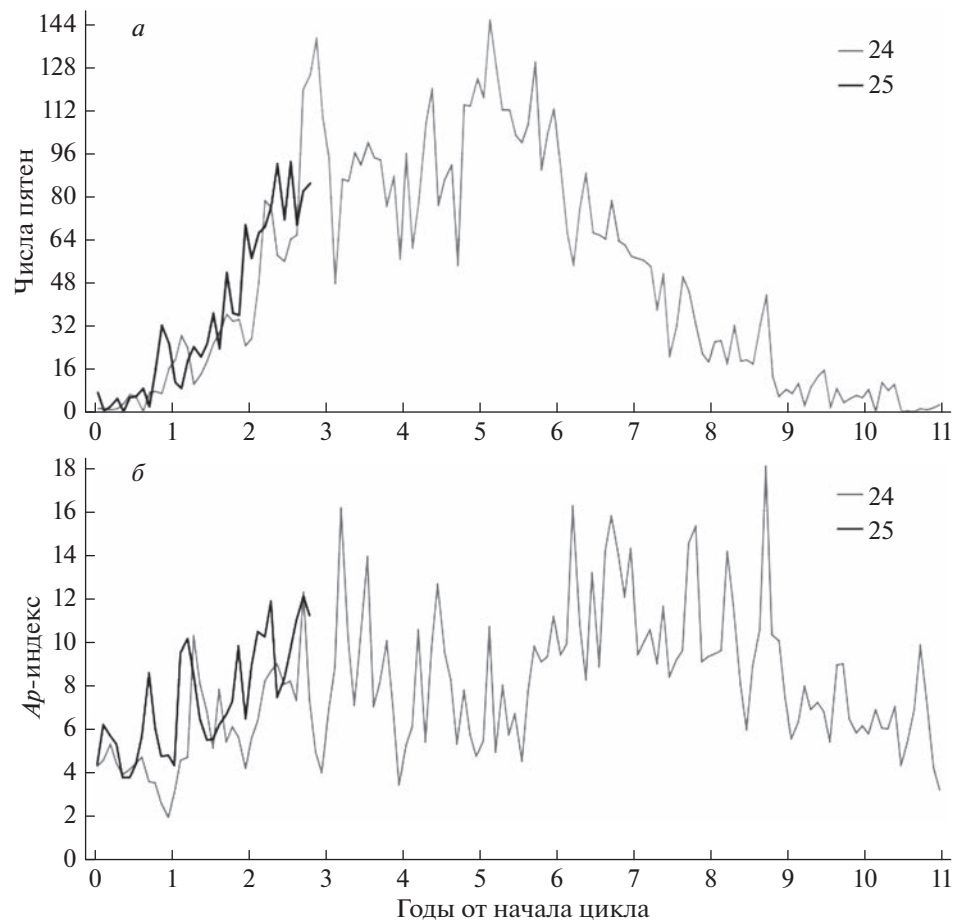


Рис. 5. Изменение (а) числа солнечных пятен и (б) геомагнитной активности по годам 24 и 25-го циклов СА.

ды. Но все же было 18 дней с бурями и ни одного дня с  $Kp_{max} = 0$ . Максимальное значение скорости СВ в 2019 г. составило 752 км/с, а среднее – 398 км/с. Напряженность межпланетного магнитного поля в этот период не превышала 18 нТл, а среднее значение составило 4.5 нТл.

Отметим также, что хотя по количеству ФЭ 2019 г. несколько превосходил 2009 г. (135 и 98 ФЭ, соответственно), то по максимальным и средним значениям амплитуды ФЭ был практически такой же (средний ФЭ – 0.62%, максимальный ФЭ – 1.6%).

Таблица 8. Рост вспышечной и геомагнитной активности в начале 25 цикла СА

| События/Год              | 2020 | 2021 | 2022 |
|--------------------------|------|------|------|
| Вспышки $\geq C1$        | 83   | 451  | 2259 |
| Вспышки $\geq M1$        | 2    | 30   | 190  |
| Бури $Kp_{max} \geq 5$ – | 8    | 23   | 44   |
| Бури $Kp_{max} \geq 7$ – | 0    | 2    | 2    |

3.9. Начало 25-го цикла СА

Прошедший 2022 г. выглядит довольно активным. Солнце очень быстро перешло из фазы минимума активности в недавнем 2020 г., в 2022 г., похожий на фазу максимума. Сравним первые годы нового цикла (табл. 8). Из таблицы видно, что вспышек средней и высокой мощности стало в 27 раз больше, а магнитных бурь вместо 8 (в 2020 г.) зарегистрировано уже 44 (в 2022 г.). Такого урожайного на бури года давно не было. Правда, практически все эти бури оказались малыми или умеренными, и только три – большими и одна – очень большой (в ноябре 2021 г. с  $Kp_{max} = 8$ –). Отметим, что похожими по количеству бурь были 2005 и 2015 гг., в них было зарегистрировано по 48 геомагнитных бурь, и только 20 лет назад (в 2003 г.) было зарегистрировано >50 бурь, а именно 63. Также пока не было особенно мощных протонных событий среди многочисленных солнечных вспышек. Происходящее похоже на нормальное начало нормального цикла. Пик СА в 25-м солнечном цикле скорее всего случится в конце 2023 – в первой половине 2024 г.

На рис. 5а показано изменение сглаженных чисел солнечных пятен по годам в 24-м (серая кривая) и 25-м (черная кривая) циклах СА. Видно, что 25-й цикл развивается немного быстрее, хотя, в целом, похоже. Особенно это наглядно в последние полтора года, с конца 2021 г. А вот геомагнитная активность (рис. 5б) более явно повышена в 25-м цикле по сравнению с 24-м. Так, за 3 года текущего цикла только в 6 месяцах серая кривая (24-й цикл) идет выше черной (25-й цикл), и это превышение всегда небольшое. А превышение черной кривой, т.е. *Ap*-индекса ГА, в 25-м цикле более частое и более значительное.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

24-й цикл солнечной активности показал самую низкую геоэффективность за всю историю современных наблюдений, а это почти 100 лет. Практически по всем геоэффективным событиям — и по протонным возрастаниям, и по геомагнитной активности, и по вариациям космических лучей, и по потокам магнитосферных электронов — зарегистрированы самые низкие средние значения параметров этих событий и самые низкие экстремальные значения.

Что касается прогноза на начавшийся 25-й цикл солнечной активности — его первый максимум может случиться уже в конце 2023 г. И поскольку в этот раз не ожидается, что первый максимум будет ниже второго, велика вероятность, что максимум солнечной активности 25-го цикла будет пройден очень скоро.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базилевская Г.А., Дайбог Е.И., Логачев Ю.И. и др. Характерные особенности солнечных космических лучей в 21–24 циклах солнечной активности по данным каталогов солнечных протонных событий // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 61. № 3. С. 8–15. 2021. <https://doi.org/10.31857/S0016794021010028>
- Безродных И.П., Морозова Е.И., Петрукович А.А., Кожухов М.А. Динамика солнечной и геомагнитной активности. III. Солнечная и геомагнитная активность в 24 цикле. Реконструкция динамики солнечной и геомагнитной // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. Т. 172. № 5. С. 10–24. 2019.
- Белов А.В. Вспышки, выбросы, протонные события // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 57. № 6. С. 783–793. 2017. <https://doi.org/10.7868/S0016794017060025>
- 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.

— Григорьев В.Г., Герасимова С.К., Гололобов П.Ю., Стародубцев С.А., Зверев А.С. Особенности спорадических вариаций плотности и анизотропии галактических космических лучей в 24 цикле солнечной активности // Солнечно-земная физика. Т. 8. № 1. С. 34–38. 2022. <https://doi.org/10.12737/szf-81202204>

— Ишков В.Н. Итоги и уроки 24 цикла — первого цикла второй эпохи пониженной солнечной активности // Астрон. журн. Т. 99. № 1. С. 54–69. 2022. <https://doi.org/10.31857/S0004629922020050>

— Калинин М.С., Базилевская Г.А., Крайнев М.Б., Свиржевская А.К., Свиржевский Н.С., Стародубцев С.А. Модуляция галактических космических лучей в 22–24 солнечных циклах: анализ и физическая интерпретация // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 57. № 5. С. 592–601. 2017. <https://doi.org/10.7868/S001679401705011X>

— Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Абуни 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. 2018. <https://doi.org/10.1134/S0016794018050103>

— Янке В.Г., Белов А.В., Гущина Р.Т. О долговременной модуляции космических лучей в 23–24 циклах солнечной активности // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 85. № 9. С. 1355–1358. 2021. <https://doi.org/10.31857/S0367676521090350>

— Andreeva O.A., Abramenko V.I., Malashchuk V.M. Coronal Holes of Cycle 24 in Observations at the Solar Dynamics Observatory // Geomagn. Aeron. V. 61. P. S1–S8. 2021. <https://doi.org/10.1134/S001679322133001X>

— Baker D.N. The occurrence of operational anomalies in spacecraft and their relationship to space weather // IEEE Trans. Plasma Sci. V. 28. P. 2007–2016. 2000. <https://doi.org/10.1109/27.902228>

— Baker D.N., Erickson P.J., Fennell J.F., Foster J.C., Jaynes A.N., Verronen P.T. Space weather effects in the Earth's radiation belts // Space Sci. Rev. V. 214. Article number 17. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0452-7>

— Belov A., Dorman L., Iucci N., Kryakunova O., Ptitsyna N. The relation of high- and low-orbit satellite anomalies to different geophysical parameters / Effects of Space Weather on Technology Infrastructure. Ed. Daglis I.A. NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry, Springer, Dordrecht. V. 176. P. 147–163. 2004. [https://doi.org/10.1007/1-4020-2754-0\\_8](https://doi.org/10.1007/1-4020-2754-0_8)

— Belov A., Garcia H., Kurt V., Mavromichalaki H., Gerontidou M. Proton enhancements and their relation to X-ray flares during the three last solar cycles // Solar Phys. V. 229. № 1. P. 135–159. 2005. <https://doi.org/10.1007/s11207-005-4721-3>

— Belov A.V. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena / Universal Heliophysical Processes. Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium. V. 257. P. 439–450. 2009.

— Belov A., Kurt V., Mavromichalaki H., Gerontidou M. Peak-size distributions of proton Fluxes and Associated

- Soft X-Ray Flares // *Solar Phys.* V. 246. № 2. P. 457–470. 2007.
- *Cane H.V.* Coronal mass ejections and Forbush decreases // *Space Sci. Rev.* V. 93. № 1/2. P. 55–77. 2000.
- *Chandra Y., Pande B., Mathpal M.C. et al.* N-S Asymmetry and periodicity of daily sunspot number during solar cycles 22–24 // *Astrophysics.* V. 65. P. 404–413. 2022. <https://doi.org/10.1007/s10511-022-09749-9>
- *Chifu I., Inhester B., Wiegmann T.* Coronal magnetic field evolution over cycle 24 // *Astron.-Astrophys.* V. 659. A174. 2022. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038001>
- *Cliver E.W., Kamide Y., Ling A.G.* The semiannual variation of geomagnetic activity: Phases and profiles for 130 years of aa data // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 64. № 1. P. 47–53. 2002.
- *Forbush S.E.* On the world-wide changes in cosmic-ray intensity // *Phys. Rev.* V. 54. P. 975. 1938.
- *Hajra R., Sunny J.V., Babu M. et al.* Interplanetary sheaths and rotating interaction regions: A comparative statistical study on their characteristics and geoeffectiveness // *Solar Phys.* V. 297. Article ID 97. 2022. <https://doi.org/10.1007/s11207-022-02020-6>
- *Lamy P.L., Floyd O., Boclet B., Wojak J., Gilardy H., Barlyaeva T.* Coronal mass ejections over solar cycles 23 and 24 // *Space Sci. Rev.* V. 215. Article number 39. 2019. <https://doi.org/10.1007/s11214-019-0605-y>
- *Lockwood J.A.* Forbush decreases in the cosmic radiation // *Space Sci. Rev.* V. 12. № 5. P. 658–715. 1971.
- *Manu V., Balan N., Zhang Q.-H., Xing Z.-Y.* Association of the main phase of the geomagnetic storms in solar cycles 23 and 24 with corresponding solar wind-IMF parameters // *J. Geophys. Res. — Space.* V. 127. Article ID e2022JA030747. 2022. <https://doi.org/10.1029/2022JA030747>
- *Marques de Souza Franco A., Hajra R., Echer E., Bolzan M.J.A.* Seasonal features of geomagnetic activity: a study on the solar activity dependence // *Ann. Geophys.* V. 39. P. 929–943. 2021. <https://doi.org/10.5194/angeo-39-929-2021>
- *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.
- *Pandey D., Pande B., Pande S.* Comparative analysis of type III solar radio bursts associated with solar particle events and its impact on space weather for solar cycle 23&24 // *Astrophys. Space Sci.* V. 367. Article number 91. 2022. <https://doi.org/10.1007/s10509-022-04129-3>
- *Patel B.D., Joshi B., Cho K.S. et al.* 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. № 2. Article number 139. 2022. <https://doi.org/10.1007/s11207-022-02073-7>
- *Pilipenko V., Yagova N., Romanova N., Allen J.* Statistical relationships between satellite anomalies at geostationary orbit and high-energy particles // *Adv. Space Res.* V. 37. P. 1192–1205. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.03.152>
- *Shi X., Fu H., Zhenghua Huang Z., Ma C., Xia L.* The solar cycle dependence of in situ properties of two types of interplanetary CMEs during 1999–2020 // *The Astrophysical J.* V. 940. Article number 103. 2022. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac9b20>
- *Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Khokhlachev A.A., Yermolaev M.Y.* Peculiarities of the heliospheric state and the solar-wind/magnetosphere coupling in the era of weakened solar activity // *Universe.* V. 8. Article number 495. 2022. <https://doi.org/10.3390/universe8100495>
- *Zhang J., Temmer M., Gopalswamy N. et al.* Earth-affecting solar transients: a review of progresses in solar cycle 24 // *Progress in Earth and Planetary Science.* V. 8. Article number 56. 2021. <https://doi.org/10.1186/s40645-021-00426-7>