

## О НАИБОЛЕЕ ИНТЕРЕСНЫХ СОБЫТИЯХ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ И КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ В 2023–2024 ГГ.

М.А. Абунина, Н.С. Шлык, С.М. Белов, А.В. Белов, А.А. Абунин

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова  
Российской Академии наук (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия, abunina@izmiran.ru

## ON THE MOST INTERESTING EVENTS IN THE SOLAR WIND AND COSMIC RAYS IN 2023-2024

M.A. Abunina, N.S. Shlyk, S.M. Belov, A.V. Belov, A.A. Abunin

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation  
of Russian Academy of Sciences, Moscow, Troitsk, Russia, abunina@izmiran.ru

**Аннотация.** Исследуются наиболее интересные крупномасштабные возмущения солнечного ветра, приведшие к значительной модуляции космических лучей и регистрации геомагнитных бурь за последние два года. Проведен анализ и представлено описание солнечных и межпланетных источников этих событий.

**Ключевые слова:** солнечный ветер, геомагнитные бури, межпланетные возмущения, Форбуш-эффекты

**Abstract.** The most interesting large-scale solar wind disturbances, which led to significant modulation of cosmic rays and registration of geomagnetic storms over the past two years, are studied. An analysis and a description of solar and interplanetary sources of these events are presented.

**Keywords:** solar wind, geomagnetic storms, interplanetary disturbances, Forbush effects

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение отдельных экстремальных возмущений межпланетной среды, космических лучей (КЛ), геомагнитной активности (ГА) и их солнечных источников позволяет оценить мощность циклов солнечной активности (СА), а также выделить их некоторые особенности. По отдельным наиболее интересным и редким событиям в научном сообществе публикуются десятки работ. Так, например, наиболее интересными событиями прошедшего 24-го цикла СА с точки зрения геомагнитных бурь и Форбуш-эффектов (ФЭ) можно считать 8–11 марта 2012 г., 22–24 июня 2015 г. и 7–8 сентября 2017 г., когда были зарегистрированы и самые значительные по величине ФЭ (11.2, 9.1 и 7.7%, соответственно), и наиболее мощные геомагнитные бури ( $K_{\text{ptax}} = 8, 8+$  и  $8+$ ).

В начале 25-го цикла СА 3–5 ноября 2021 г. было зарегистрировано мощное межпланетное возмущение, во время которого был зарегистрирован и большой ФЭ (9.8%), и очень большая магнитная буря ( $K_{\text{ptax}} = 8$ ). Однако в 2023–2024 гг., когда по некоторым оценкам была фаза максимума цикла [Nandy, 2021; Obridko et al., 2021], наблюдался ряд достаточно мощных межпланетных возмущений, некоторые из которых мы будем рассматривать в данной статье.

Цель данной работы: выделить и исследовать крупномасштабные возмущения солнечного ветра и связанные с ними вариации плотности КЛ (жесткостью 10 ГВ) в 2023–2024 гг., описать солнечные источники наиболее мощных событий фазы максимума 25-го цикла СА.

### ДАнные И МЕТОды

В работе используется база данных ФЭ и межпланетных возмущений (FEID — Forbush effects and Interplanetary Disturbances), созданная в ИЗМИРАН, которая сейчас доступна онлайн

(<http://tools.izmiran.ru/feid/>). Часовые вариации плотности и анизотропии КЛ в FEID рассчитаны методом глобальной съемки [Belov et al., 2018] для частиц с жесткостью 10 ГВ. Часовые значения скорости солнечного ветра (СВ), межпланетного магнитного поля (ММП), индексов ГА, данные по SSC, корональным дырам, корональным выбросам массы (КВМ), магнитным облакам (МО), солнечным вспышкам и др. добавлены в FEID и берутся из открытых Интернет-источников. Данные нейтронных мониторов (НМ) в реальном времени (<https://www.nmdb.eu/>) отбираются в соответствии с методом кольца станций (МКС, [Abunina et al., 2020]). Отметим, что МКС используется для изучения аномалий (предпонижений и предповышений) в интенсивности КЛ, обычно предшествующих значительным ФЭ. Предпонижения, по видимому, можно объяснить эффектом «конуса потерь», в котором Земля оказывается магнитно связанной с обедненной КЛ областью за фронтом ударной волны [Belov et al., 1995; Leerungnavarat et al., 2003], в то время как предповышения вызваны ускорением галактических КЛ на фронте приближающихся возмущений в результате отражения частиц от ударной волны [Belov et al., 1995; Kudela, Storini, 2006].

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В 2020 г. начался новый цикл СА. И сейчас он уже приближается к максимуму: в 2023–2024 гг. наблюдался значительный рост солнечной и геомагнитной активности. Многочисленные мощные солнечные события вызвали отклик в магнитосфере Земли и были зарегистрированы большие магнитные бури, а также значительные ФЭ. Ниже описываются наиболее интересные, с нашей точки зрения, события в космических лучах и межпланетной среде и их солнечные источники за последние два года.

**Апрель 2023 г.**

21 апреля в 17:44 UT в активной области (АО) 13283 к северу от южной полярной корональной дыры была зарегистрирована вспышка M1.7 (S22W11), после которой на коронографе SOHO/LASCO в 18:12 UT наблюдалось КВМ типа гало с начальной скоростью 1284 км/с.

Вышеупомянутое межпланетное возмущение достигло орбиты Земли через двое суток (рис. 1а): 23 апреля в 17:38 UT началась очень большая магнитная буря ( $Kp_{max} = 8+$ , с проходящими значениями  $Kp=9$ ,  $Dst_{min} = -212$  нТл). В описываемом межпланетном возмущении скорость СВ достигала значения 706 км/с, а величина индукции ММП – 33.6 нТл, к тому же было зарегистрировано МО (с 01:00 UT 24 апреля длительностью 42 ч). Важно отметить, что повышенная скорость СВ (около 500 км/с) сохранялась на протяжении второй половины МО, что можно связать с воздействием высокоскоростного потока из южной полярной корональной дыры. Также был зарегистрирован один из самых больших по величине в 25-м цикле СА ФЭ с амплитудой  $AF=7.2$  % (до 2024 г. самым большим считался ФЭ с амплитудой 9.8 % в ноябре 2021 г.). На рис. 1б особенно заметен эффект предвозрастания (синие кружки обозначают положительную вариацию скорости счета), начинающийся примерно за 36 ч до начала события на НМ, обращенных к Солнцу, а затем распространяющийся на все станции, поскольку фронт межпланетного возмущения приближался к Земле.

Этот эффект был настолько силен на данной выборке станций, что преобладает над ожидаемым уменьшением КЛ в течение нескольких часов после ударной волны (SSC), пока не началось МО (заштрихованная желтым область).

**Март 2024 г.**

24 марта 2024 г. был зарегистрирован большой ФЭ (~15 % по данным станции НМ Оулу, а по усредненным данным станций НМ, используемых в МКС, >12 %). Солнечным источником данного события стал КВМ (от 23 марта 2024 г. в 01:25 UT с  $V_0 = 1613$  км/с), который был связан с солнечной вспышкой класса X1.1 из АО 3614 (23 марта 2024 г. в 01:33 UT). Ударная волна соответствующего межпланетного КВМ была зарегистрирована в 14:10 UT 24 марта 2024 г. (рис. 2). Кроме того, 20–22 марта 2024 г. центральный меридиан проходила корональная дыра, высокоскоростной поток из которой стал дополнительным источником высокой скорости СВ у Земли. Во время этого межпланетного возмущения максимальная скорость СВ составила более 850 км/с, а ММП увеличилось до значения 31 нТл (рис. 2а). Что касается геомагнитной активности, то была зарегистрирована очень большая геомагнитная буря ( $Kp_{max} = 8$ ,  $Dst_{min} = -130$  нТл). Долготно-временное распределение вариаций КЛ для ФЭ 24 марта 2024 г. представлено на рис. 2б. Имеются явные признаки предвозрастания на долготах >150° за несколько часов до начала события.

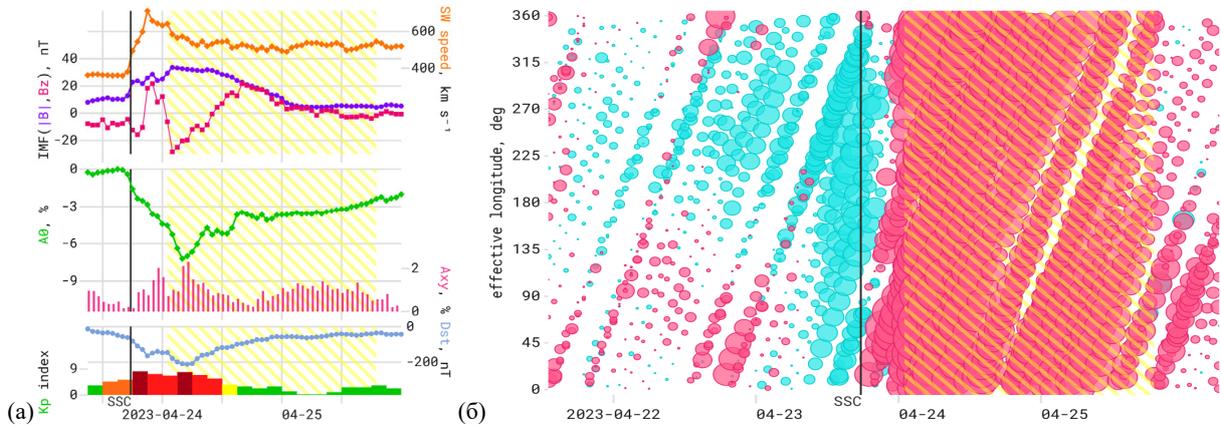


Рис. 1. (а) Данные скорости СВ, ММП, КЛ, ГА; (б) МКС для события 23 апреля 2023 г.

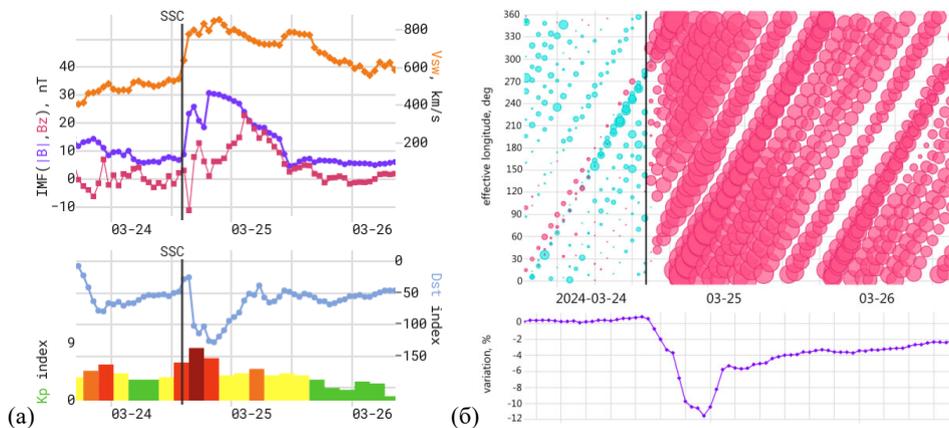


Рис. 2. (а) Данные скорости СВ, ММП и ГА; (б) МКС для события 24 марта 2024 г. и усредненный ФЭ по станциям НМ, используемых в МКС

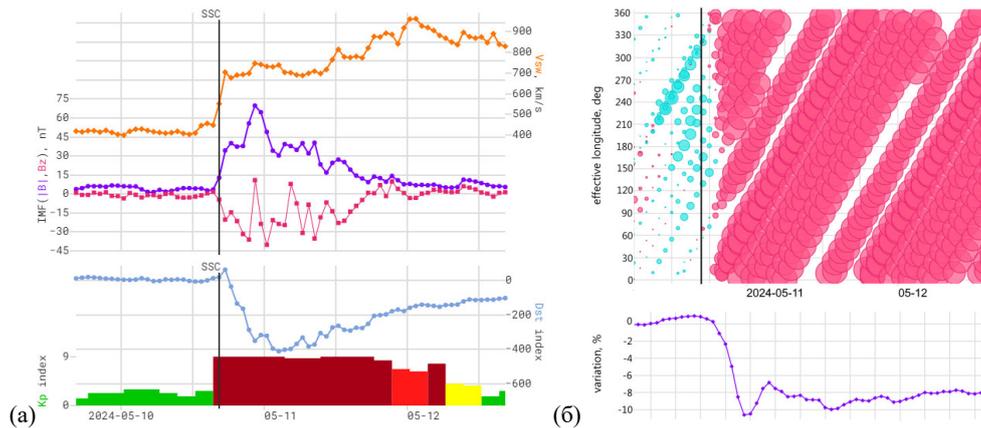


Рис. 3. (а) Данные скорости СВ, ММП и ГА; (б) МКС для события 10 мая 2024 г. и усредненный ФЭ по станциям НМ, используемых в МКС

### Май 2024 г.

8–11 мая 2024 г. на Солнце была зарегистрирована серия больших вспышек из АО 13364 и связанных с ними мощных КВМ типа гало (со скоростями >1000 км/с). Начало геомагнитных возмущений во второй половине 10 мая (около 16:30 UT) связано с воздействием корональных выбросов от 8 мая. В связи высокой скоростью (>700 км/с) этого межпланетного возмущения, очень большими значениями ММП (>50 нТл) и длительными (>12 ч) отрицательными значениями  $B_z$  (<-15 нТл) на Земле началась самая мощная геомагнитная буря за последние 20 лет.  $K$ -индекс геомагнитной активности возрос до значения 9Z, а  $Dst$ -индекс достиг значения -412 нТл, к тому же значение  $K$ -индекса держалось на уровне 8–9 более суток. Во время данной магнитной бури максимальные значения скорости СВ у Земли достигли значения 994 км/с, а ММП — 73 нТл. По усредненным данным станций НМ, используемых в МКС, ФЭ достиг значения ~10 %. На рис. 3б явно видно предвозрастание на долготах >120° за несколько часов до развития события.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2023–2024 гг. наблюдалось множество значительных ФЭ и ГА; самые мощные возмущения были описаны в этой статье. Каждое из этих событий характеризуется сложным поведением параметров СВ и КЛ и связано с несколькими солнечными источниками. Также, перед мощными межпланетными возмущениями обычно наблюдаются предвестники в данных космических лучей за несколько часов до регистрации события у Земли. Можно с большой долей вероятности говорить, что этот период является периодом максимума солнечной активности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Abunina M.A., Belov A.V., Eroshenko E.A., et al. Ring of stations method in cosmic rays variations research // *Solar Phys.* 2020. V. 295. ID 69.
- Belov A. V., Eroshenko E. A., Yanke V. G., et al. Global survey method for the world network of neutron monitors // *Solar Phys.* 2018. V. 293. ID 68.
- Nandy D. Progress in Solar Cycle predictions: Sunspot Cycles 24–25 in perspective // *Solar Phys.* 2021. V. 296. ID 54.
- Obridko V.N., Sokoloff D.D., Shibalva A.S., et al. Zonal harmonics of solar magnetic field for solar cycle forecast // *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 2021. V. 225. ID 105743.
- Kudela K., Storini M. Possible tools for space weather issues from cosmic ray continuous records // *Adv. Space Res.* 2006. V. 37. P. 1443–1449.
- Leerungnavarat K., Ruffolo D., Bieber J.W. Loss cone precursors to Forbush decreases and advance warning of space weather effects // *Astrophys. J.* 2003. V. 593. P. 587–596.
- Belov A.V., Dorman L.I., Eroshenko E.A., et al. Search for predictors of Forbush decreases, Proc. 24th ICRC. Rome, Italy. 1995. V. 4. P. 888-891.
- URL: <http://tools.izmiran.ru/feid/> (дата обращения 21.05.2024)
- URL: <https://www.nmdb.eu/> (дата обращения 21.05.2024)