Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2024. С. 99–101.

УДК 523.985, 524.1-352 DOI: 10.62955/0135-3748-2024-99

ВСПЫШКИ, ВЫБРОСЫ И ПРОГНОЗ ПРОТОННЫХ ВОЗРАСТАНИЙ

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

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, Москва, Россия,
nshlyk@izmiran.ru

X-RAY FLARES, CMEs AND PROTON EVENT FORECASTING

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

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

Аннотация. На основе постоянно пополняемой базы данных рентгеновских вспышек и протонных возрастаний, созданной и поддерживаемой в ИЗМИРАН, были проанализированы протонные события разной величины и их солнечные источники (вспышки и ассоциированные с ними корональные выбросы массы) за длительный период с 1996 по 2023 гг. Проведен подробный анализ различных характеристик этих событий, получены корреляционные связи между ними, рассчитаны соответствующие регрессионные коэффициенты. Описанные зависимости используются для разработки эмпирической модели, позволяющей оценить вероятность регистрации протонного возрастания у Земли и максимальную величину потока частиц разных энергий на основе данных о вспышке и корональном выбросе массы.

Ключевые слова: солнечные вспышки, корональные выбросы массы, СПС.

Abstract. Using a constantly updated database of X-ray flares and proton enhancements created and maintained at IZMIRAN, proton events of various magnitudes and their solar sources (X-flares and associated coronal mass ejections) were analyzed for the period from 1996 to 2023. An extent analysis of these events was conducted, correlations between their characteristics were obtained and the corresponding regression coefficients were calculated. All the described dependencies are used to build an empirical model that makes it possible to estimate the probability of a proton enhancement near the Earth and the maximum value of the flux of particles with different energies based on data on solar flare and coronal mass ejection.

Keywords: solar flares, coronal mass ejections, SEP

ВВЕДЕНИЕ

Частицы солнечных космических лучей разных энергий представляют значительный риск для жизни космонавтов, негативно влияют на спутниковую электронику, экипажи и пассажиров самолетов, совершающих трансполярные рейсы [Dorman, 2006; Lario et al., 2009; Mishev et al, 2015; Townsend et al., 2018]. Несмотря на то, что такие частицы наблюдаются с помощью различных космических аппаратов и наземных приборов уже несколько десятилетий, наше понимание физики процессов их ускорения и распространения в межпланетном пространстве все еще неполное. Существует ряд работ, в которых установлены различные зависимости между характеристиками рентгеновских вспышек или корональных выбросов массы (КВМ) и параметрами солнечных протонных событий (СПС) [Bazilevskaya et al. 2006; Kahler 2011; Cliver et al 2012; Richardson et al. 2016; Belov, 2017], а также созданы различные модели протонных возрастаний (см. обзор [Whitman et al., 2022]).

Целью данной работы является составление каталога СПС (для энергий >10 и >100 МэВ) за 1996–2023 гг., а также анализ и уточнение статистических связей между величиной протонных возрастаний и характеристиками рентгеновских вспышек и КВМ для создания эмпирической модели СПС.

ДАННЫЕ

Основой для создания каталога послужила ежедневно пополняемая база данных рентгеновских вспышек и протонных возрастаний [Белов, 2017 и ссылки в нем], дополненная данными о начальной скорости соответствующих КВМ, выделенных на коронографе LASCO [cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/]. Установление связи «вспышка-КВМ-протонное возрастание» проводилось отдельно для каждого события, путем анализа всех доступных источников информации, включая ежедневные видео Солнца в ультрафиолете, коронографические наблюдения, потоки рентгена и частиц разных энергий (спутники GOES: https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-x-ray-flux, https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-proton-flux), данные о скорости, направлении КВМ и пр. Всего было выделено 307 СПС, в которых поток частиц с энергией >10 МэВ превысил 0.1 pfu (группа P10), из них 166 событий, в которых поток частиц с энергией >100 МэВ был >0.01 pfu (группа P100) и 18 наземных возрастаний частиц (GLE). Также была отобрана контрольная группа из 600 событий «вспышка-КВМ», которые не привели к регистрации каких-либо СПС.

На рис. 1 приведено долготное распределение всех исследуемых событий в зависимости от величины потоков частиц (голубые кружки — без СПС, синие кружки — P10, квадраты — P100, ромбы — GLE), балла соответствующей рентгеновской вспышки (слева) и начальной скорости КВМ (справа). Почти все точки контрольной группы на обеих панелях лежат в нижней части рисунка, что подтверждает необходимость (но не достаточность) рентгеновский вспышки высокого балла и быстрого КВМ для регистрации СПС у Земли. Также хорошо видно, что солнечные источники всех протонных возрастаний значительно смещены в западное полушарие и чаще всего связаны со вспышками балла >M1, при этом для западных источников скорости

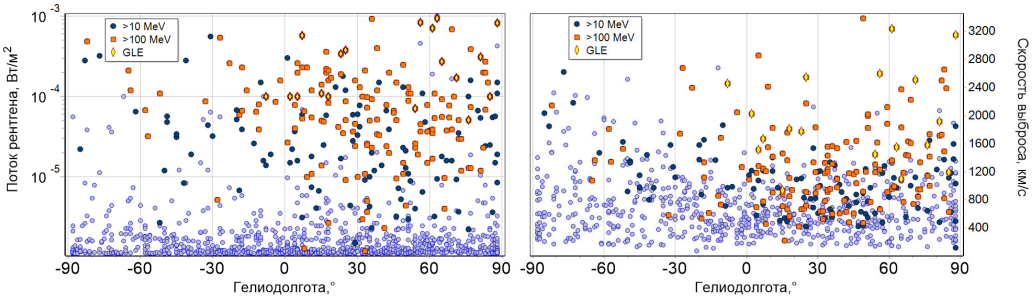

Рис. 1. Основные характеристики событий: величины и долготы рентгеновских вспышек для разных потоков частиц (слева), начальные скорости соответствующих КВМ (справа)

могут быть значительно меньше, чем для восточных, но наиболее значительные СПС наблюдаются при начальных скоростях КВМ не менее 1000–1200 км/с.

В таблице приведены средние значения различных параметров для трех групп событий: Xm — максимальный поток рентгена, t — время от начала до максимума вспышки, φ — гедиодолгота, P10 — поток частиц с энергией >10 МэВ, P100 — поток частиц с энергией >100 МэВ, V0 — начальная скорость КВМ. Анализ таблицы позволяет сделать вывод о том, что чем выше значения параметров, характеризующих солнечные источники (Xm, t, V0), тем большие потоки частиц следует ожидать, особенно, при расположении источника в благоприятной западной долготной зоне.

Таблица.

Средние значения различных характеристик событий.

	Без СПС (600)	P10 (307)	P100 (166)
Xm*10^6, Вт/м^2	40 ± 2.8	93 ± 8.3	122 ± 13.4
t, мин	25 ± 1.1	33 ± 1.9	31 ± 2.7
φ, °	–1 ± 2.1	28 ± 2.3	33 ± 2.8
V0, км/с	653 ± 16	1161 ± 33	1320 ± 49
P10, pfu	0	380 ± 128	690 ± 235
P100, pfu	0	10 ± 3.5	19 ± 6.5

Большое количество событий и достаточно равномерное распределение источников по диску Солнца позволяет оценить вероятности регистрации СПС определенного уровня в зависимости от мощности вспышки и гелиокоординат. На рис. 2 кружки и числа разных цветов соответствуют вероятностям регистрации СПС: частиц с энергиями >10 МэВ — зеленый, >100 МэВ — красный, GLE — желтый.

Видно, что имея вспышку балла ~X10 с долготами W30–W70 следует со 100 % вероятностью ожидать СПС для частиц с энергиями и >10 МэВ, и >100 МэВ, при этом и вероятность GLE также высока (>60 %).

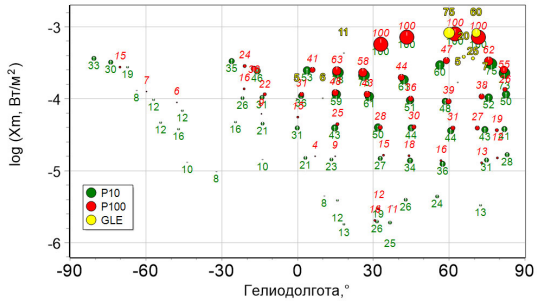

Рис. 2. Зависимость вероятности регистрации СПС от гелиодолготы и балла вспышки

В более ранних работах [Белов, 2017] уже было показано, что наилучшие связи с величиной СПС показывает комбинированный вспышечный индекс Ix, представляющий собой произведение максимального потока рентгена на длительность фазы роста вспышки и индекс начальной скорости КВМ. Для построения модели СПС разумно ограничиться именно западными долготами, а также только теми событиями, в которых связь между солнечным источником и СПС установлена наиболее достоверно. Таких событий оказалось 163 из группы P10 и 98 из группы P100. На рис. 3 приведена связь величины потока протонов разных энергий с произведением двух выше упомянутых индексов для СПС с гелиодолготами источников W20–W88 в логарифмической шкале. Коэффициенты корреляции составляют 0.7±0.04 и 0.73±0.05 для левой и правой панели соответственно. Коэффициенты линейной регрессии составляют A = –2.2±0.06 и B = 1.09±0.09 для левой панели, A = –3.8±0.07 и B = 1.08±0.103 для правой панели.

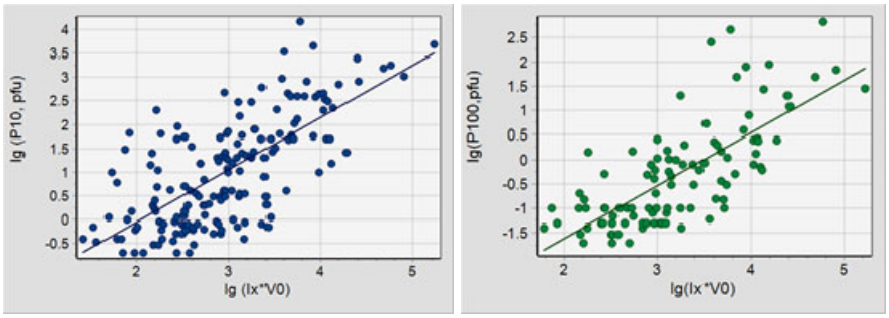

Рис. 3. Связь потока частиц с энергиями >10 МэВ (слева) и >100 МэВ (справа) с произведением вспышечного индекса и начальной скорости КВМ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Составлен каталог СПС (для энергий >10 и >100 МэВ) за 1996–2023 гг. Проведено сопоставление характеристик возрастаний потоков протонов, регистрируемых у Земли спутниками GOES, с характеристиками КВМ и солнечных вспышек. Рассчитаны средние значения различных параметров и установлены закономерности, которые позволяют оценивать вероятность СПС, а также величину ожидаемых потоков протонов по солнечным данным, доступным с минимальной временной задержкой. Полученные результаты положены в основу эмпирической прогностической модели СПС, подробное описание и отладка которой будут задачами дальнейшей работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Белов А.В. Вспышки, выбросы, протонные события // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 57, № 6. С. 1–12.

Bazilevskaya G.A., Sladkova A.I., Svirzhevskaya A.K. Features of the solar X-ray bursts related to solar energetic particle events // Adv. Space Res. 2006. V. 37, N 8. P. 1421−1425.

Cliver E.W., Ling A.G., Belov A., Yashiro S. Size distributions of solar flares and solar energetic particle events // Astrophys. J. Letters. 2012. V. 756, N 2. P. L29−L33.

Dorman L. Cosmic ray interactions, propagation, and acceleration in space plasmas. Springer, Dordrecht, 2006. 847 P.

Kahler S.W. The correlation between solar energetic particle peak intensities and speeds of coronal mass ejections: Effects of ambient particle intensities and energy spectra // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. P. 20947−20956.

Lario D., Aran A., Decker R.B. Major solar energetic particle events of solar cycles 22 and 23: Intensities close to the streaming limit // Solar Phys. 2009. V. 260 P. 407–421.

Mishev A.L., Adibpour F., Usoskin I.G., Felsberger E. Computation of dose rate at flight altitudes during ground level enhancements no. 69, 70 and 71 // Adv. Space Res. 2015. V. 55. P. 354–362.

Richardson I.G., von Rosenvinge T.T., Cane H.V. The properties of solar energetic particle event-associated coronal mass ejections reported in different CME catalogs // Solar Phys. 2015. V. 290, N 6. P. 1741–1759.

Townsend L.W., Adams J.H., Blattnig et al. Solar particle event storm shelter requirements for missions beyond low Earth orbit // Life Sci. in Space Res. 2018. V. 17 P. 32–39.

URL: cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/ (дата обращения 21.05.2024)

URL: https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-x-ray-flux (дата обращения 21.05.2024)

URL: https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-proton-flux (дата обращения 21.05.2024)