

АСТРОНОМИЯ И ФИЗИКА КОСМОСА

УДК 523.9

**О СВЯЗИ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ
С ВСПЫШКАМИ И ВЫБРОСАМИ КОРОНАЛЬНОЙ
МАССЫ ПО ДАННЫМ КАТАЛОГА NASA**

Г. А. Базилевская

На массиве данных 1997–2024 гг. о солнечных протонах с энергией $E \geq 10$ МэВ из каталога NASA рассмотрена относительная роль солнечной вспышки и коронального выброса массы (КВМ) в генерации солнечных протонов. Показано, что оба источника важны, и отрицание вклада вспышки в ускорение протонов в постепенных солнечных протонных событиях неправильно. Роль вспышки увеличивается, а роль КВМ уменьшается при возрастании энергии протонов от ~ 10 МэВ до $\gtrsim 1$ ГэВ.

Ключевые слова: солнечные протонные события, солнечные вспышки, корональные выбросы массы.

Введение. Солнечные космические лучи (СКЛ) – частицы с энергией выше $\sim$ сотни кэВ (нижняя граница условна), наводняющие космическое пространство в результате взрывного эруптивного энерговыделения на Солнце – являются предметом дискуссий на протяжении десятилетий с момента их первого наблюдения в 1942 г. [1]. Самой важной проблемой, вокруг которой ведутся споры, является вопрос об источнике СКЛ, на роль которого претендуют два основных явления – солнечная вспышка, выделяемая по излучению в мягком рентгене 1–8 Å, и корональный выброс массы (КВМ). Оба этих фактора сопоставимы по общему энерговыделению на Солнце ($\sim 10^{32}$ эрг) и сопровождаются процессами ускорения частиц. Пересоединение магнитных силовых линий в области вспышки приводит к ускорению протонов электрическим полем. Возникающая при взрыве турбулентность способствует стохастическому ускорению. КВМ генерируют крупномасштабные ударные волны, по обе стороны фронта которых образуются турбулентные слои, создавая условия для стохастического и диффузного ускорения на

ударном фронте. Поскольку объем публикаций на эту тему не поддается краткому описанию, здесь приведены ссылки только на несколько последних обзоров [2–7].

Вспышки и КВМ являются независимыми проявлениями эруптивного процесса, и СКЛ могут ускоряться в них независимо. В одном и том же солнечном протонном событии (СПС) возможно присутствие протонов, ускоренных одним или обоими этими источниками. Задача разделения их вклада усложняется так называемым синдромом большой вспышки [8]: мощное энерговыделение на Солнце приводит к усилению всех связанных с ним явлений, которые таким образом коррелируют между собою даже в отсутствие физических связей.

Обширный набор физических процессов, связанных с СКЛ, быстро растущий массив наблюдательных данных и постоянная активность Солнца, не устающего генерировать новые СКЛ, привели к необходимости создания каталогов, большинство которых рассматривает СПС, т. к. протоны составляют более 90% СКЛ. Отечественная серия каталогов СПС, создаваемая под руководством и редакцией Ю. И. Логачева [9–15] является самой продолжительной; она охватывает СПС с 1970 г., описывает потоки и энергетические спектры солнечных протонов, дает информацию о вероятных источниках СПС и снабжена графиками временных профилей потоков частиц и их энергетических спектров. В настоящее время имеется довольно много других каталогов, описывающих СПС с разной степенью детализации [16–24]. Плодотворное использование каталогов предусматривает сравнение и упорядочение содержащейся в них информации. Задачей настоящей работы является получение некоторых статистических результатов по данным каталога СПС NASA [25], предназначенных для сопоставления с соответствующими результатами каталогов под редакцией Ю. И. Логачева [9–15]. Само сопоставление полученных результатов будет выполнено в следующей работе.

Результаты обработки данных. Работа с каталогом начинается с представления данных и их статистического анализа. Каталог [25] содержит СПС, в которых были зарегистрированы протоны с энергией $E \geq 10$ МэВ и потоком протонов в максимуме события $J_{10} \geq 10 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}$ (10 pfu). Приведены даты события, значения J_{10} , координаты и интенсивность отождествленной (родительской) вспышки, скорость и угловая ширина родительского КВМ, а также временные параметры СПС и источников, которые в данной работе не анализируются. Здесь использованы данные с 1997 г. по 2024 г., для которых были доступны необходимые для работы временные ряды по рентгеновским вспышкам [26] и КВМ [27]. За этот период в каталог [25] вошло 187 СПС. Удалось сопоставить с КВМ 172 события, со вспышкой – 156 событий. Для 90% СПС

родительские вспышки были классов X (40%) и M (50%). Практически все отождествленные родительские КВМ имели скорость $V > 500$ км/с, 145 из них были типа гало. Поскольку общее число вспышек на Солнце и число КВМ в несколько раз превосходит число СПС, для дальнейшего сравнения с СПС взяты только вспышки классов M и X и КВМ с $V > 500$ км/с.

На рис. 1 показаны годовые значения числа СПС, КВМ и суммарного числа вспышек классов M и X, использованные в настоящей работе. Приведено также число солнечных пятен SN [28], чтобы показать достаточную репрезентативность материала. Аномальный рост числа вспышек в 2024 г. был вызван ростом вспышек класса M и не отразился на числе СПС. Этот вопрос требует дальнейшего изучения.

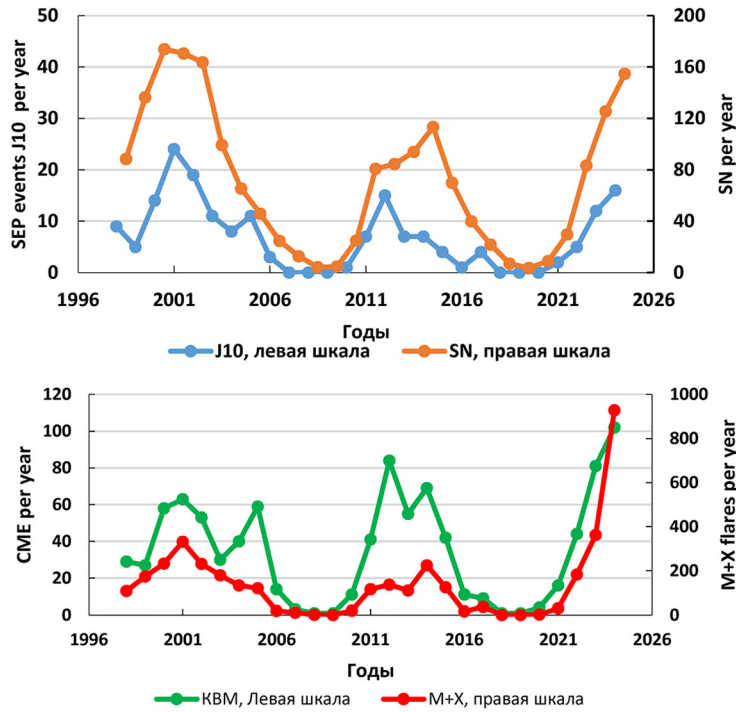


Рис. 1: Верхняя панель: годовые значения максимальных потоков солнечных протонов с $E \geq 10$ МэВ (кружки, левая шкала) и число солнечных пятен (ромбы, правая шкала). Нижняя панель: то же, но для числа КВМ с $V > 500$ км/с (квадраты, левая шкала) и числа вспышек классов M и X (треугольники, правая шкала).

На рис. 2 показано соотношение $J10$ в индивидуальных СПС со скоростью родительского КВМ V и с интенсивностью родительской вспышки P .

Величина $J10$ растет с ростом интенсивности вспышки и с увеличением скорости КВМ, причем зависимость $J10$ от скорости КВМ более сильная ($J10 \sim V^2$), чем от интен-

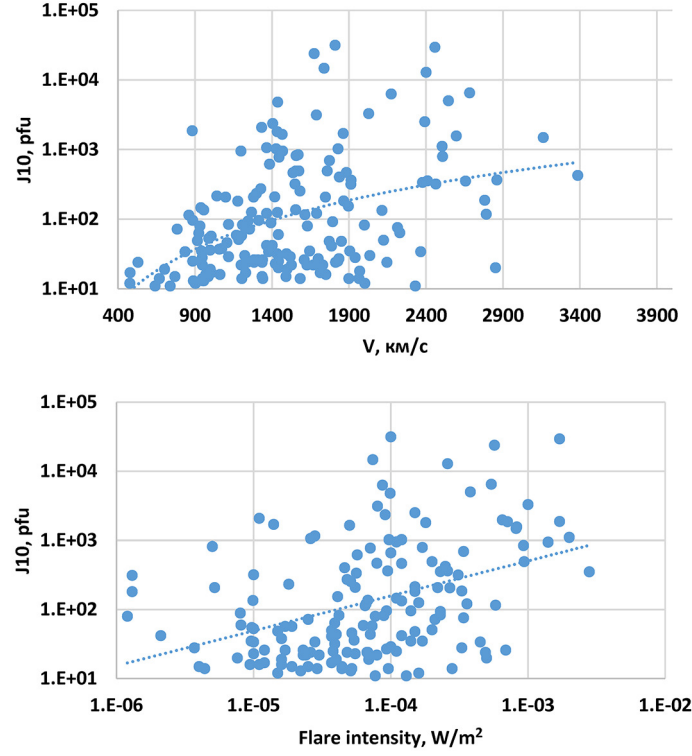


Рис. 2: Верхняя панель: соотношение между максимальным потоком солнечных протонов J_{10} ($E \geq 10$ МэВ) и начальной скоростью родительского КВМ (V); нижняя панель: то же, но для интенсивности родительской вспышки (P).

сивности вспышки ($J_{10} \sim P^{0.5}$). Однако достоверность аппроксимации мала и практически одинакова для вспышек и КВМ ($R^2 \approx 0.17$). Корреляция потоков J_{10} со скоростью КВМ значительно выше, чем с интенсивностью вспышки: $CC(J_{10}, V) = 0.40 \pm 0.06$, $CC(J_{10}, P) = 0.24 \pm 0.08$. Таким образом, потоки протонов с $E \geq 10$ МэВ лучше коррелируют с КВМ, чем со вспышками, но это не решает вопроса о вкладе обоих источников в генерацию солнечных протонов, т. к. здесь рассматриваются отождествленные источники СПС, тогда как подавляющее число вспышек и КВМ вообще не сопровождаются солнечными протонами, наблюдаемыми на орбите Земли.

Далее сделана попытка исследовать корреляцию числа СПС с полным числом вспышек и числом КВМ. Для расчета коэффициентов корреляции были вычислены месячные и годовые значения числа СПС, N_{j10} , с 1997 г. по 2024 г. согласно каталогу [25] и соответствующие значения суммарного (т. е. включая неотожествленные) числа вспышек класса М и X, N_f , [26], а также числа КВМ со скоростью $V \geq 500$ км/с, N_{ste} , [27]). Чтобы оценить возможную зависимость источников от энергии протонов, такие

же расчеты сделаны для наземных возрастаний СКЛ (GLE) [29]. Хотя пороговая энергия протонов, инициирующих GLE, 433 МэВ (жесткость 1 ГВ), их эффективная энергия порядка 1 ГэВ и больше. Табл. 1 демонстрирует полученные коэффициенты корреляции $CC(N_{j10}, N_{cme})$, $CC(N_{j10}, N_f)$, $CC(N_{gle}, N_{cme})$ и $CC(N_{j10}, N_f)$. Можно отметить, что все корреляции являются значимыми, но годовые значения коэффициентов корреляции существенно выше, чем месячные. Это означает, что временной ряд СПС хорошо отражает 11-летний цикл солнечной активности – именно он определяет годовые значения числа СПС. Поскольку число СПС примерно в 20 раз меньше числа вспышек классов M+X и в ~ 4 раза меньше, чем число KBM с $V \geq 500$ км/с, месячные значения числа СПС нередко бывают равны нулю, несмотря на наличие вспышек и KBM. Это уменьшает корреляцию при использовании месячных значений. Для массива J10 корреляция с числом KBM N_{cme} значимо выше, чем с числом вспышек N_f как для годовых, так и для месячных значений. Для GLE наблюдается противоположная тенденция – корреляция с числом вспышек выше, чем с числом KBM как в годовых, так и в месячных данных. Это означает, что для ускорения частиц до энергий выше 500 МэВ вклад вспышки важнее, чем вклад KBM. Однако корреляционный анализ показывает, что и вспышка, и KBM участвуют в ускорении протонов: фактически нет разницы в корреляции СПС со вспышками между J10 и GLE.

Т а б л и ц а 1

Коэффициенты корреляции между числами СПС N_{j10} , N_{gle} ,
и числами родительских вспышек N_f и KBM N_{cme} по наблюдениям 1997–2024 гг.

	$N_{cme} V \geq 500$ км/с	$N_f(M + X)$
Годовые значения		
N_{j10}	0.81 ± 0.07	0.67 ± 0.10
N_{gle}	0.45 ± 0.15	0.67 ± 0.10
Месячные значения		
N_{j10}	0.65 ± 0.03	0.50 ± 0.04
N_{gle}	0.29 ± 0.05	0.48 ± 0.04

Обсуждение результатов. В большинстве СПС, по-видимому, присутствуют частицы, ускоренные всюду, где имеются условия для ускорения – как в области вспышки, так и в окрестностях KBM. Статистический анализ позволяет лишь нащупать тенденцию в распределении ролей этих двух факторов. Значения коэффициентов корреляции показывают, что вклад KBM в ускорение протонов с $E \geq 10$ МэВ выше, чем вклад вспышек.

Для годовых значений GLE этот вклад тоже является существенным, но меньшим, чем для J10. Для месячных значений GLE корреляция с KBM мала. Коэффициенты корреляции между числом СПС и числом вспышек классов M и X значимы и практически одинаковы для протонов с $E \geq 10$ МэВ и для GLE. Это означает, что отрицать вклад вспышки в генерацию так называемых постепенных СПС, как, например, в [4, 6, 7] вряд ли правомерно. Более важным является вывод о сравнительном вкладе KBM – он выше, чем вклад вспышек, для протонов с $E \geq 10$ МэВ, но ниже, чем вклад вспышек, для протонов с $E \geq 500$ МэВ (GLE). Таким образом, можно утверждать, что для протонов с $E \geq 10$ МэВ определяющим источником является KBM, а в генерации GLE более важным источником является вспышка. Именно ускорение электрическим полем в области вспышек, вероятно, приводит к появлению GLE [30]. Возрастание роли вспышки и уменьшение роли KBM с увеличением энергии солнечных протонов подтверждает результаты работы [3], где изучались протоны в диапазоне 5–200 МэВ. Несмотря на синдром большой вспышки, можно ожидать дальнейшего прогресса в понимании процессов ускорения частиц в эруптивных событиях на Солнце. Следует изучать данные в различных диапазонах энергии протонов, привлекать данные об электронах и ядрах солнечного происхождения. С другой стороны, нужно более тщательно исследовать зависимость источников от гелиокоординат и их временные характеристики. Необходимая информация накапливается в каталогах СКЛ и ждет сравнительного анализа данных.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] S. E. Forbush, Phys. Rev. **70**, 771 (1946). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.70.771>.
- [2] M. Dierckxsens, K. Tziotziou, S. Dalla, et al., Solar Phys. **290**, 841 (2015). DOI: 10.1007/s11207-014-0641-4.
- [3] M. Desai, J. Giacalone, Living Rev. Sol. Phys. **13**, 3 (2016). DOI: 10.1007/s41116-016-0002-5.
- [4] N. Gopalswamy, Geosci. Lett. **3**, 8 (2016). DOI: 10.1186/s40562-016-0039.
- [5] K.-L. Klein, S. Dalla, Space Sci Rev. **212**, 1107 (2017). DOI: 10.1007/s11214-017-0382-4.
- [6] D. V. Reames, Space Science Reviews **219**, 14 (2023). Doi.org/10.1007/s11214-023-00959-x.
- [7] D. V. Reames, Astronomy **4**(1), 5 (2025). Doi.org/10.3390/astronomy4010005.

- [8] S. W. Kahler, J. Geophys. Res. **87**(a5), 3439 (1982). DOI: 10.1029/JA087iA05p03439.
- [9] С. Т. Акиньян, Г. А. Базилевская, В. Н. Ишков и др. *Каталог солнечных протонных событий. 1970–1979 гг.* Ред. Ю. И. Логачев (М., ИЗМИРАН, 1982). DOI: 10.2205/ESDB-SAD-P.
- [10] Г. А. Базилевская, Э. В. Вашенюк, В. Н. Ишков и др., *Каталог энергетических спектров солнечных протонных событий 1970–1979 гг.* Ред. Ю. И. Логачев (М., ИЗМИРАН, 1986). DOI: 10.2205/ESDB-SAD-P.
- [11] Г. А. Базилевская, Э. В. Вашенюк, В. Н. Ишков и др., *Солнечные протонные события. Каталог, 1980–1986 гг. Данные наблюдений частиц и электромагнитных излучений.* Ред. Ю. И. Логачев (М., МГК АН СССР, 1990). DOI: 10.2205/ESDB-SAD-P.
- [12] Г. А. Базилевская, Э. В. Вашенюк, В. Н. Ишков и др., *Солнечные протонные события. Каталог, 1980–1986 гг. Временные профили интенсивности и энергетические спектры протонов, синоптические карты и схемы групп пятен.* Ред. Ю. И. Логачев (М., МГК АН СССР, 1990). DOI: 10.2205/ESDB-SAD-P.
- [13] А. И. Сладкова, Г. А. Базилевская, В. Н. Ишков и др., *Каталог солнечных протонных событий 1987–1996.* Ред. Ю. И. Логачев (М., МГУ, 1998). DOI: 10.2205/ESDB-SAD-P.
- [14] Ю. И. Логачёв, Г. А. Базилевская, В. Н. Ишков и др., *Каталог солнечных протонных событий 23-го цикла солнечной активности (1996–2008 гг.)* (М., Мировой центр данных по солнечно-земной физике, 2016). DOI: 10.2205/ESDB-SAD-P-001-RU.
- [15] Ю. И. Логачёв, Г. А. Базилевская, Н. А. Власова и др., *Каталог солнечных протонных событий 24-го цикла солнечной активности (2009–2019 гг.)* (М., Мировой центр данных по солнечно-земной физике, 2022). DOI: 10.2205/ESDB-SAD-008.
- [16] V. Kurt, A. Belov, H. Mavromichalaki, M. Gerontidou, Annales Geophysicae **22**(6), 2255 (2004). DOI: 10.5194/angeo-22-2255-2004.
- [17] R. Vainio, E. Valtonen, B. Heber, et al., J. Space Weather Space Clim **3**, A12 (2013). DOI: 10.1051/swsc/2013030.
- [18] N. Crosby, D. Heynderickx, P. Jiggins, et al., Space Weather **13**, 406 (2015). DOI: 10.1002/2013SW001008.
- [19] A. Papaioannou, I. Sandberg, A. Anastasiadis, et al., J. Space Weather Space Clim. **6**, A42 (2016). Doi.org/10.1051/swsc/2016035.

- [20] M. Paassilta, O. Raukunen, R. Vainio, et al., J. Space Weather Space Clim. **7**, A14 (2017). DOI: 10.1051/swsc/2017013.
- [21] R. Miteva, S. Samwel, M. Costa-Duarte, Solar Physics **293**(2), article id. 27, (2018). DOI: 10.1007/s11207-018-1241-5.
- [22] S. Rotti, B. Aydin, M. K., Georgoulis, P. C. Martens, The Astrophys. Journ. Supp. Ser. **262**(1), 29 (2022). DOI: 10.3847/1538-4365/ac87ac.
- [23] N. Dresing, A. Yli-Laurila, S. Valkila, et al., A&A **687**, A72 (2024). Doi.org/10.1051/0004-6361/202449831.
- [24] M. Jarry, C. Palmroos, E. Lavasa, et al., A&A **708**, A368 (2026). Doi.org/10.1051/0004-6361/202557965.
- [25] Каталог NASA. Available online: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/sepe/.
- [26] XRT Flare Catalog. Available online: http://xrt.cfa.harvard.edu/flare_catalog/.
- [27] SOHO LASCO CME CATALOG – Version 2. Available online: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/.
- [28] Sunspot number. Available online: <https://www.sidc.be/SILSO/datafiles/>.
- [29] Neutron Monitor Database. Available online: <https://NMDB.eu/nest/>.
- [30] B. V. Somov, *Plasma Astrophysics, Pt. II. Reconnection and Flares*. Astrophysics and Space Science Library, Vol. 392, 2nd ed. (NewYork, Springer, 2013).

Поступила в редакцию 22 июня 2026 г.

После доработки 2 июля 2026 г.

Принята к публикации 3 июля 2026 г.