

ДЛИТЕЛЬНОСТЬ И ТЕМП УСКОРЕНИЯ ПРОТОНОВ В GLE И НЕ GLE СОБЫТИЯХ

**Струминский А.Б.¹, Садовский А.М.¹,
Ожередов В.А.¹, Григорьева И.Ю.²**

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

DURATION AND ACCELERATION RATE OF PROTONS IN GLE AND NON GLE EVENTS

Struminsky A.B.¹, Sadovskii A.M.¹, Ozheredov V.A.¹, Grigoryeva I.Yu.²

¹Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia

²Main Astronomical (Pulkovo) Observatory of RAS, St.-Petersburg, Russia

To study flares and associated proton events (Ground Level Enhancement (GLE) and non-GLE) in May–June 2024, data from the ACS SPI (The AntiCoincidence Shield of the SPectrometer on the INTEGRAL) detector are used, which records primary and secondary HXR >100 keV. Secondary HXR are produced by the interaction of galactic and solar protons in the ACS SPI. The onset of a significant increase in the ACS SPI count rate during or after a solar flare's HXR emission may be the moment of the first detection of solar protons entering Earth's orbit. The rate and time of proton acceleration can be estimated from the time interval between the start of registration of electron emission >100 keV and the first arrival of protons >100 MeV into the Earth's orbit. In flares accompanied by proton events (with and without GLEs), there was sufficient electric field strength and time to accelerate protons (to >100 MeV and >450 MeV). Otherwise, there was insufficient time and/or field strength in flares to accelerate visible protons to >30 MeV. Eruptive flares (proton and non-proton) can be classified by electric field strength (by the time of electron acceleration to 100 keV and the moment of arrival of the first protons) and the duration of observation of electron emission above 100 keV (the time available for acceleration of protons >100 MeV).

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-299-302>

В каталоге [1] о возрастаниях интенсивности солнечных космических лучей (СКЛ) над фоном галактических космических лучей (ГКЛ) в межпланетном пространстве (МП) говорят, как о солнечных протонных событиях (СПС), если поток протонов > 10 МэВ превысил $1 \text{ (см}^2\text{с}\cdot\text{ср)}^{-1} = 1 \text{ PFU}$ (Proton Flux Unit). Отдельным СПС считается время непрерывного возрастания более 1 PFU, при этом различают новый СПС и повторный максимум еще продолжающегося СПС в зависимости от наличия нового солнечного источника. Считается, что СПС сопровождается наземным возрастанием интенсивности космических лучей (Ground Level Enhancement – GLE), если наземное возрастание интенсивности СКЛ зарегистрировано более чем двумя нейтронными мониторами (НМ), причем один из них не полярный и не высокогорный. При регистрации возрастания меньшим числом НМ говорят о subGLE. Такое определение GLE события накладывает жесткие

ограничения на энергетический спектр и поток солнечных протонов (СП), наблюдаемый в МП, который является результатом процессов ускорения и распространения СКЛ.

Для исследования вспышек и связанных с ними СПС (GLE и не GLE) в мае–июне 2024 года используются данные детектора ACS SPI (The Anti-Coincidence Shield of the SPectrometer on the INTEGRAL) [2], который регистрирует первичные и вторичные жесткие рентгеновские лучи (HXR) > 100 кэВ. Вторичные HXR рождаются при взаимодействии в ACS SPI галактических и солнечных протонов. Начало значимого возрастания темпа счета ACS SPI во время или после HXR излучения солнечной вспышки может быть моментом первой регистрации прихода СП на орбиту Земли [3].

Цель работы – сделать оценки средней напряженности электрического поля $\mathcal{E} = \Delta p / e\tau$ необходимой для ускорения СП от 10 МэВ (137 МВ) до 30–500 МэВ $E_p(p_p, \beta)$ за доступное время в четырех вспышках в мае–июне 2024 г. (см. таблицу, рис. 1 и рис. 2). Данные по вспышкам и корональным выбросам массы (КВМ) были взяты с сайта [6]. Доступное время τ – это разность времени начала протонного возрастания относительно начала радиоизлучения на 15.4 ГГц (второй столбец, мин) и времени запаздывания протонов с энергией 30–500 МэВ при свободном распространении на длине 1.3 а.е. относительно электромагнитного сигнала (четвертая строка [мин]). Эти вспышки были благоприятно расположены на диске Солнца для наблюдения СПС вблизи Земли и был выполнен критерий по температуре плазмы > 12 МК (рис. 1а и 2а) для ускорения протонов [7]. Однако только вспышки, представленные на рис. 2, отмечены в каталоге [1] как источники СПС, причем событие 11 мая 2024 сопровождалось GLE, 8 июня 2024 – subGLE.

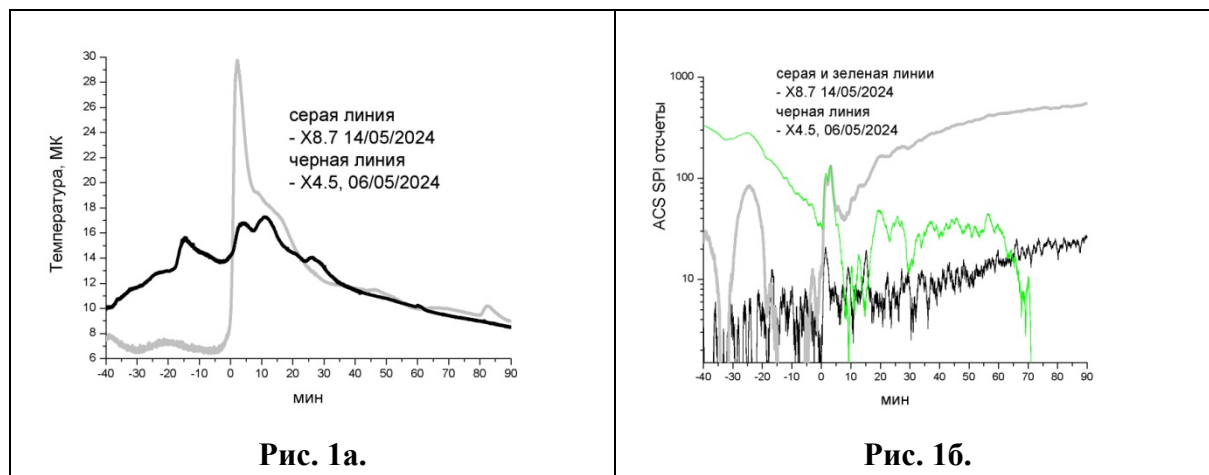
В таблице для выбранных событий (первый столбец) приведены результаты расчета средней напряженности электрического поля [В/см]. Ожидаемый момент первого прихода СП той или иной энергии на орбиту Земли показан в четвертой строке таблицы. Возрастания темпа счета ACS SPI позднее этого времени связаны с приходом СП, а ранее – с солнечным HXR излучением и/или с изменением радиационного фона ГКЛ и СКЛ. Найденную среднюю напряженность электрического поля имеет смысл сравнивать с напряженностью поля Драйсера $E_D \approx 10^{-8} n/T$ [В/см], где n – концентрация плазмы в см^{-3} , а T – её температура в К [4]. Для типичных условий во вспышках она равна $\sim 10^{-4}$ В/см [5].

Три слабых и коротких эпизода ускорения электронов > 100 кэВ (всплески HXR 6 мая 2024 г., рис. 1б) соответствуют слабому среднему электрическому полю (см. табл.) на масштабе времени ускорения протонов, пришедших на 40 мин. В этом событии КВМ не было. По всей видимости, СП не были ускорены, а возрастание ACS SPI на 40 мин, вероятно, связано с модуляцией ГКЛ.

Таблица.

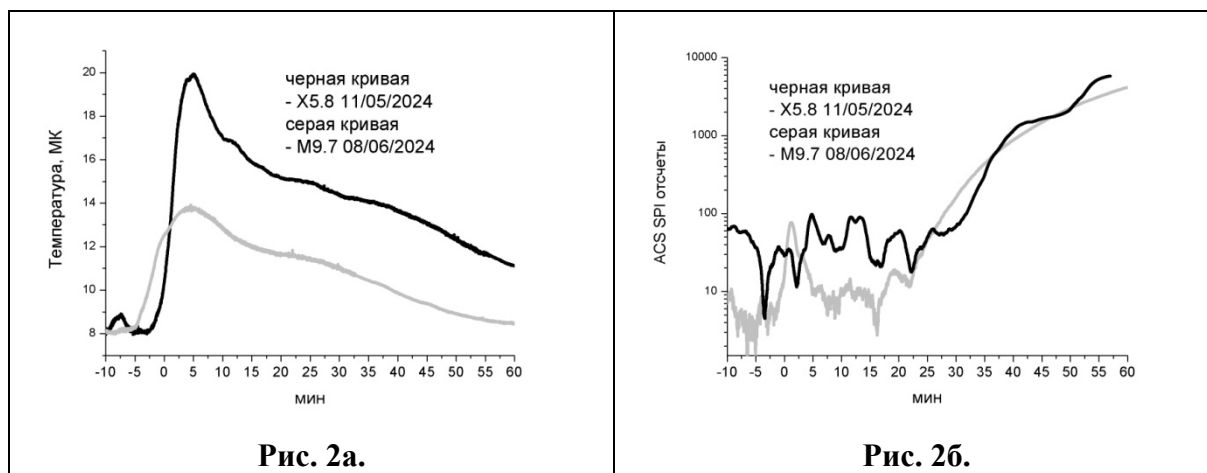
E_p , МэВ		30	50	100	300	500
P_p , МВ		239	310	444	808	1090
$\beta=V/c$		0.25	0.31	0.43	0.65	0.76
дата, вспышка	мин	35	27	17	8.3	6.0
06/05/24, X4.5	40	$1.1 \cdot 10^{-5}$	$7.4 \cdot 10^{-6}$	$7.4 \cdot 10^{-6}$	$1.2 \cdot 10^{-5}$	$1.6 \cdot 10^{-5}$
11/05/24, X5.8	21	нет	нет	$4.3 \cdot 10^{-5}$	$2.9 \cdot 10^{-5}$	$3.5 \cdot 10^{-5}$
14/05/24, X8.7	10	нет	нет	нет	$2.2 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-4}$
	16	нет	нет	нет	$4.7 \cdot 10^{-5}$	$5.2 \cdot 10^{-5}$
08/06/24, M9.7	21	нет	нет	$4.3 \cdot 10^{-5}$	$2.9 \cdot 10^{-5}$	$3.5 \cdot 10^{-5}$

Протонное возрастание от самой мощной вспышки 25-го цикла X8.7 14 мая 2024 г. произошло на фазе спада СПС 13 мая и поэтому не попало в каталог СПС [1]. Коронаграфом LASCO наблюдалось Halo KBM со скоростью 2010 км/с [6]. Протонное возрастание видно в данных ACS SPI после 10–16 мин, и свидетельствует об ускорении протонов >300 МэВ (рис. 1б, табл.). Всплески HXR длительностью менее 10 мин показывают, что, возможно, не хватило времени для ускорения протонов со спектром необходимым для регистрации наземного возрастания GLE.



Вспышка X5.8 11 мая 2024 г. стала источником протонов для GLE74, которое было зарегистрировано сетью НМ на фоне сильной геомагнитной бури и Форбуш-эффекта. После вспышки наблюдалось Halo KBM со скоростью 1614 км/с [6]. Начало протонного возрастания ACS SPI (рис. 2) было раньше, чем начало GLE74 в 01:55 UT. Протоны с >430 МэВ должны были прийти к Земле позже протонов меньших энергий (обратная дисперсия скоростей). Ускорение протонов было менее интенсивным, чем в X8.7 14 мая, но длилось более 20 мин (наблюдение HXR всплесков).

Самое мощное СПС в 25-ом цикле $1029 \text{ (см}^2\text{с}\cdot\text{ср)}^{-1} > 10 \text{ МэВ}$ (на начало сентября 2024 год) произошло от вспышки M9.7 8 июня 2024 года, оно сопровождалось лишь subGLE. Очевидно, что интенсивности протонов $> 430 \text{ МэВ}$ в СПС 8 июня были меньше, чем в СПС 11 мая 2024 года (GLE74). Так как во вспышке M9.7 HXR излучение было малым или отсутствовало после 10 мин (рис. 2б), то, возможно, не хватило времени для ускорения протонов со спектром характерным для GLE событий.



Вообще говоря, во вспышках, которые сопровождаются СПС (без или с GLE), достаточно напряженности электрического поля и времени для ускорения протонов (до $> 100 \text{ МэВ}$ и $> 450 \text{ МэВ}$). В противном случае во вспышках недостаточно времени и/или не хватает напряженности поля для ускорения видимых протонов до $> 30 \text{ МэВ}$. Эруптивные вспышки (протонные и не протонные) можно классифицировать по напряженности электрического поля (по времени ускорения электронов до 100 кэВ и моменту прихода первых протонов) и длительности наблюдения излучения электронов выше 100 кэВ (времени, доступному для ускорения протонов $> 100 \text{ МэВ}$). Такой подход был применен нами впервые в [7] для исследования мощных СПС 23–25 циклов активности.

Работа выполнена в рамках программ: «Плазма» в ИКИ РАН (АБС, АМС, ВАО) и «Многоволновая активность Солнца» (ИЮГ) в ГАО РАН.

Литература

1. <http://swxdev.sinp.msu.ru>
2. <https://isdc.unige.ch/~savchenk/spiacs-online/spiacspnlc.pl>
3. Струминский А.Б., Зимовец И.В. // Изв РАН. Сер. Физ., 2009, т.73, с. 332.
4. Trubnikov V.A. // Reviews of Plasma Physics. 1965. V. 1. P. 105.
5. Лысенко А.Л. и др. // УФН. 2020. Т. 190. С. 878–894.
6. https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list
7. Струминский А.Б. и др. // Геомагн. и Аэрон. 2024. Т. 64. № 2. С. 163.
8. Григорьева И.Ю. и др. // Космич. исслед. 2023. Т. 61. № 3. С. 230.