

ТЕМП УСКОРЕНИЯ ПРОТОНОВ ВО ВСПЫШКАХ M4.0 16 ИЮЛЯ и M5.7 17 ИЮЛЯ 2023 ГОДА

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

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

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

PROTON ACCELERATION RATE IN FLARES: M4.0 ON 2023 JULY 16 AND M5.7 ON 2023 JULY 17

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

¹Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia

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

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-305-308>

We analyzed proton and HXR enhancements of the ACS SPI count rate in the events: (1) M4.0 on July 16 and (2) M5.7 on July 17, 2023. The onsets of >100 keV HXR enhancements are taken as zero time. Duration of proton acceleration and rate of energy gain are estimated by using onsets of the proton enhancements. The proton onset is at +13 min in (1) and at +30 min in (2). For path length of 1.3 a.u. the delay time of proton arrival relatively photons (1 a.u.) is 6 min and 17 min for proton energy of 500 and 100 MeV, respectively. Plasma was heated up to 12 MK (onset of proton acceleration) with 2 min delay in (1) and without delay in (2) relatively to zero, i.e. for proton acceleration and propagation were available 11 min in (1) and 30 min in (2). Therefore protons of 300 MeV were arrived firstly in (1) and protons of 100 MeV in (2). Duration of proton acceleration would be 300 s and, therefore, acceleration rate should be not less than 1.7 MeV/s in (1). Duration of proton acceleration would be 780 s and, therefore, acceleration rate should be 0.13 MeV/s in (2). Fast electron acceleration ~ 10 MeV/s (“early” proton enhancement of ACS SPI count rate) was realized in the M4.0 flare, but “slow” electron acceleration (“late” proton enhancement) in the M5.7 flare. Early and weak proton enhancement in the event (1) allows to suggest that an amount of >500 MeV protons enough for the ACS SPI enhancement, but not for neutron monitors might arrive after +10 min in the event on October 28, 2021 (GLE73).

Оценки времени ускорения электронов до 100 кэВ, которые составляют от нескольких десятков до нескольких сотен мс [1, 2], известны из наблюдений. Если взять предельные оценки в 10 и 1000 мс, то темп набора энергии электронами будет 10 и 0.1 МэВ/с. Темп набора энергии протонами не может превышать эти значения. Если ускорение происходит в одном и том же электрическом поле, то можно ожидать разброс времени ускорения протонов до 100 МэВ от 10 до 1000 с, а для протонов 300 МэВ (генерации π_0 -мезонов) – от 30 с до 50 мин.

Распад π_0 -мезонов (γ -кванты >65 МэВ) в мощных солнечных вспышках обычно наблюдается через 3–4 мин после нагрева плазмы до 12 МК (начала ускорения протонов [3]), т.е. темп набора энергии протонами оказывается <2 МэВ/с, что согласуется с наблюдаемым темпом набора энергии электронами.

Время распространения протонов 100 МэВ до Земли по спирали Паркера (1.3 а.е. при скорости солнечного ветра 300 км/с) составляет 25 мин (запаздывание относительно фотонов 17 мин). При ускорении на Солнце протонов в диапазоне от 100 до 300 МэВ и их регистрации на Земле, становятся существенными эффекты дисперсии по скоростям, т.е. не всегда на Землю первыми приходят протоны больших энергий.

Цель работы – сделать оценки темпа набора энергии протонами во вспышках (1) M4.0 16 июля и (2) M5.7 17 июля 2023 года по наблюдениям первого прихода протонов и сравнить их со случаями «раннего» (17 мая 2012, GLE71) и «позднего» (28 октября 2021, GLE73) прихода протонов [3–5]. Анализируются кривые блеска Антисовпадательной защиты спектрометра на ИНТЕРГАЛе (ACS SPI), которая регистрирует жесткое рентгеновское излучение (HXR) >100 кэВ. Это могут быть как первичные (в частности, солнечные), так и вторичные фотоны. Вторичные фотоны рождаются в теле детектора под действием протонов космических лучей >100 МэВ (галактических (ГКЛ) и солнечных (СКЛ)). На рис. 1А показан темп счета ACS SPI за 50 мс, сглаженный за 1 мин после вычитания фона ГКЛ. Монотонное возрастание темпа счета ACS SPI более ~ 10 мин после начала солнечного HXR излучения (рис. 1А), обычно связаны с СКЛ [3–5].

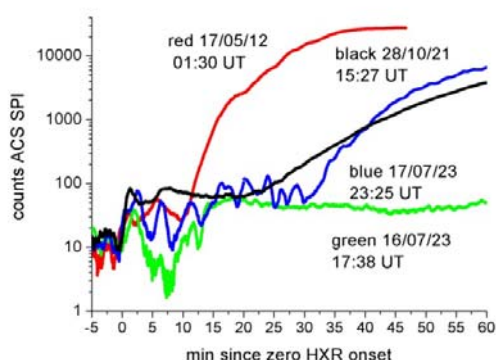


Рис. 1А.

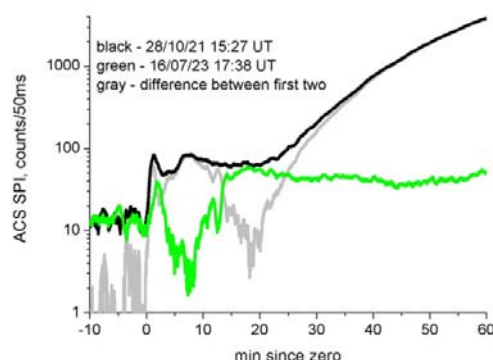


Рис. 1Б.

При заполнении таблицы 1 мы руководствовались данными в файлах YYYYMMDD.txt [6]. Все времена указаны в минутах относительно нуля – начала радиоизлучения на 15.4 ГГц. Столбцы: «А» дата, нулевое время UT и координаты вспышки; «Б» балл и начало SXR вспышки; «В» начало и конец превышения T_{SXR} 12МК; «Г» начало отклика ACS SPI на солнечные HXR и протоны [7]; «Д» максимальная зарегистрированная частота RSTN (ГГц), начало и конец; «Е» минимальная зарегистрированная частота RSTN (МГц), начало и конец; «Ж» типы непрерывных радио всплесков, начало и конец; «З» радио всплески II типа, начало и конец; «И» момент первого появления KBM (LASCO_C2), средняя скорость (км/с) и угол распространения [8]; «К» интенсивность протонов >10 МэВ $(\text{см}^2 \text{ с ср})^{-1}$ [9].

Таблица 1.

А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	И	К
17.05.12 01:30UT N13W87	M5.1 -5	-1 +38	0 +10	15.4 0 +14	245 -1 +28	IV +2 +82	+1 +11	+18 1582 268	255
28.10.21 15:27UT S26W05	X1.0 -10	0 +17	0 +20	15.4 +18	245 0 +25	IV +5 +102	+2 +26	+21 1526 189	22
16.07.23 17:38UT S23W58	M4.0 -2	+2 +15	0 +13	15.4 0 +3	245 -1 +6	V 0 +14	нет	+15 1239 220	0.1 4
17.07.23 23:25 UT S26W87	M5.7 - 7	-3 +25	0 +30	15.4 +10 +21	245 -12 +25	СТМ +35 +374	нет	+11 1385 223	614

В таблице 2 представлены (через вертикальную черту |), рассчитанные времена τ_p (с) и темпы ускорения A_p (МэВ/с) протонов для разных кинетических энергий E_p . Они вычислены по началу регистрации протонов ACS SPI T_{pACS} (второй столбец, мин) и времени запаздывания протонов E_p при распространении по спирали Паркера до Земли (путь 1.3 а.е.), относительно электромагнитного сигнала T_{DELAY} (третья строка, мин): $\tau_p = 60 (T_{pACS} - T_{DELAY})$ и $A_p = E_p/\tau_p$. В событии 17 мая 2012(GLE71) наблюдалось одно из самых «ранних» возрастаний ACS SPI [3, 5] на 10 мин, относительно нуля. Темп ускорения протонов в GLE71 был сопоставим или даже больше (табл. 2), чем оцененный по π_0 -распаду выше в тексте.

Таблица 2.

E_p , МэВ		100	200	300	400	500	1000
$\alpha = V/c$		0.43	0.57	0.65	0.71	0.76	0.88
дата	мин	17	11	8.27	6.86	5.96	4.31
17/05/12	10	нет	нет	104 2.9	188 2.1	242 2.1	341 2.9
28/10/21	20	180 0.6	540 0.4	704 0.4	788 0.5	842 0.6	941 1.1
16/07/23	7	нет	нет	нет	9 47	63 8	300 3.3
	11	нет	нет	164 1.8	248 1.6	302 1.7	401 2.5
17/07/23	30	780 0.1	1140 0.2	1304 0.2	1388 0.3	1442 0.3	1541 0.6

В силу наблюдения протонного возрастания (1) на фоне падающего потока СКЛ от предыдущего протонного события, время начала определено с разбросом от +9 до +13 мин (рис. 1А). Вспышка (1) необычная – момент прогрева плазмы до 12МК (начало ускорения протонов) запаздывает, относительно начала HXR излучения на 2 мин (табл. 1). По нашим представлениям [3, 10] это должно уменьшить время ускорения протонов также на 2 мин, соответственно до 7 и 11 мин (табл. 2). Поэтому оценки темпа ускорения протонов в (1) не превышают аналогичные оценки для GLE71 (при начале протонного возрастания не ранее +12 мин).

Начало протонного возрастания в событии 28 октября 2021 (GLE73) было «поздним», на +20 мин [3,4], а темп ускорения протонов был слабым (табл. 2). Однако наблюдение «раннего» и слабого протонного возрастания в событии (1) позволяет предположить, что в GLE73 в темп счета ACS SPI после +10 мин (рис. 1А) мог быть существенный вклад от протонов СКЛ >300 МэВ. На рис. 1Б серым цветом показана разница между кривыми блеска 28 октября 2021 года (черный цвет) и события (1) (зеленый цвет). «Позднее» протонное возрастание на +30 мин в событии (2) соответствует еще более слабому темпу ускорения протонов (табл. 2). Аналогичные соображения могут быть применимы к событию (2) о возможном вкладе слабого протонного возрастания (1) от протонов СКЛ >300 МэВ (рис. 1А).

Поток протонов >100 МэВ J_{100} в событии (1) 16 июля 2023 года можно оценить по данным ACS SPI, зная разницу в 100 импульсов между фоновым и наблюдаемым темпом счета, $J_{100} = J_{ГКЛ} (N - N_{фон}) / N_{фон1} = 0.0015 \text{ (см}^2 \text{ с ср)}^{-1}$, где $N_{фон1} = 6843 \text{ имп/50 мс}$ (28 октября 2021 года) и $J_{ГКЛ} = 0.1 \text{ (см}^2 \text{ с ср)}^{-1}$. Далее можно оценить поток протонов >10 МэВ J_{10} в предположении степенного спектра $E^{-\gamma}$, используя найденную величину J_{100} . Для жесткого спектра (28 октября 2021) с показателем $\gamma = 1.7$ получим $J_{10} = J_{100} E_{100}^{\gamma} / E_{10}^{\gamma} < 0.1 \text{ (см}^2 \text{ с ср)}^{-1}$, т.е. J_{10} не превысит фон ГКЛ. Для мягкого спектра (17 июля 2023) при $\gamma = 3.4$ получим $J_{10} = 4 \text{ (см}^2 \text{ с ср)}^{-1}$, т.е. выше фона ГКЛ, но ниже порога СПС $10 \text{ (см}^2 \text{ с ср)}^{-1}$. Эти оценки приведены в табл. 1 в строке «К» для (1). Показатель спектра в событиях 28 октября 2021 года и 17 июля 2023 года вычислен в [10] по наблюдаемым максимальным величинам темпа счета ACS SPI и потока J_{10} . Подчеркнем, что вспышка M4.0 16 июля 2023 года отвечает всем критериям протонных вспышек [11].

Литература

1. *Altyntsev A.T., et al. // Astrophys. J., 2019, V. 883:38 (13pp).*
2. *Лысенко А.Л. и др. // УФН, 2020, Т. 190, С. 878–894.*
3. *Григорьева И.Ю. и др. // Косм. Иссл., 2023, т. 61, № 3, с. 230–241.*
4. *Струминский А.Б. и др. // Изв. РАН. Сер. Физ., 2023, том 87, № 7, с. 1028–1032.*
5. *Григорьева И.Ю., Струминский А.Б. // Астрон. журн., 2022, Т. 99, № 6, с. 486–495.*
6. https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/NOAA/org_events_text/2023/
7. <https://isdc.unige.ch/~savchenk/spiaccs-online/spiaccspnlc.pl>
8. https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list
9. https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/index.php?gcm=1&lang=ru
10. *Струминский А.Б. и др. // Косм. Иссл., 2023, принято в печать.*
11. *Струминский А.Б. и др. // Геомагн. и Аэронам., 2023, принято в печать.*