

О ВОЗМОЖНЫХ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПРОТОНОВ В СОБЫТИЯХ 4-10 СЕНТЯБРЯ 2017 ГОДА

Григорьева И.Ю.¹, Струминский А.Б.², Шаховская А.Н.³

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

³Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Республика Крым, Научный, Россия

ON POSSIBLE ADDITIONAL PROTON SOURCES IN THE EVENTS OF SEPTEMBER 4-10, 2017

Grigoryeva I.Yu.¹, Struminsky A.B.², Shakhovskaya A.N.³

¹Main Astronomical (Pulkovo) Observatory RAS, St. Petersburg, Russia

²Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia

³Crimean Astrophysical Observatory RAS, Nauchny, Republic of Crimea, Russia

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-71-74>

The work involves the selection and study of solar flare candidates for SPE sources from September 4 to September 10. Data of solar flares in AR 12673 presented in NOAA files YYYYMMDDevents.txt have been considered. Compliance with the criteria for electromagnetic radiation of flares specified in the SPEs catalog confirms their involvement as SPE sources. The discrepancy raises the question of new models of the solar atmosphere to explain the observed effects, for example, the hypothesis of radiation belts in the active region to explain how flares-sources could “pump” the solar corona with protons.

В конце 24-ого цикла солнечной активности первая декада сентября 2017 года преподнесла сразу несколько солнечных протонных событий (СПС) 4, 6, 7 и 10 сентября по версии сводной таблицы каталога СПС [1], где указаны возможные их источники. Согласно нашим представлениям процесс ускорения частиц (электронов и протонов) во вспышечной плазме активной области (АО), последовательно проявляет себя в различных областях электромагнитного спектра от радио до гамма [2]. Мы проверили, как указанные источники удовлетворяют выработанным ранее критериям «протонности» солнечных вспышек, зарегистрированных на видимом диске Солнца [3].

Если температура вспышечной плазмы (T_{SXR}), излучающей мягкие рентгеновские лучи (SXR), превысила 10(12) МК и держалась так более 5(2) мин, то по-видимому, ускорялись протоны с энергиями (E) < 10 МэВ. Если при этом происходило ускорение электронов с $E > 100$ кэВ (наблюдался жесткий рентгеновский (HXR) всплеск с $E > 100$ кэВ и/или микроволновой всплеск на частотах > 3 ГГц (RSTN) длительностью > 5 мин), и вспышка развивалась вверх в корону (всплески на частотах < 610 МГц (RSTN) и II, IV-типов длительностью > 5 мин), то ускоряющиеся протоны могут достичь $E \sim 200$ МэВ и более. При преодолении протонами порога $E > 300$ МэВ рождения π_0 -мезонов их распад может привести к наблюдаемому γ -излучению с

$E > 100$ МэВ. Также к уже перечисленным критериям можно добавить факты регистрации непрерывных радио всплесков V-VII и СТМ типов продолжительное время (более часа), которые указывают на присутствие ускоренных электронов в короне. Обнаружение наших критериев должно быть связано со вспышкой в АО с благоприятным положением на диске (западная полусфера и ± 30 градусов по широте) для регистрации СПС вблизи Земли. Ускорение коронального выброса массы (КВМ), движущегося со средней скоростью > 618 км/с, может способствовать выходу протонов на благоприятную силовую линию и быстрому их распространению в межпланетном пространстве (МП) [2].

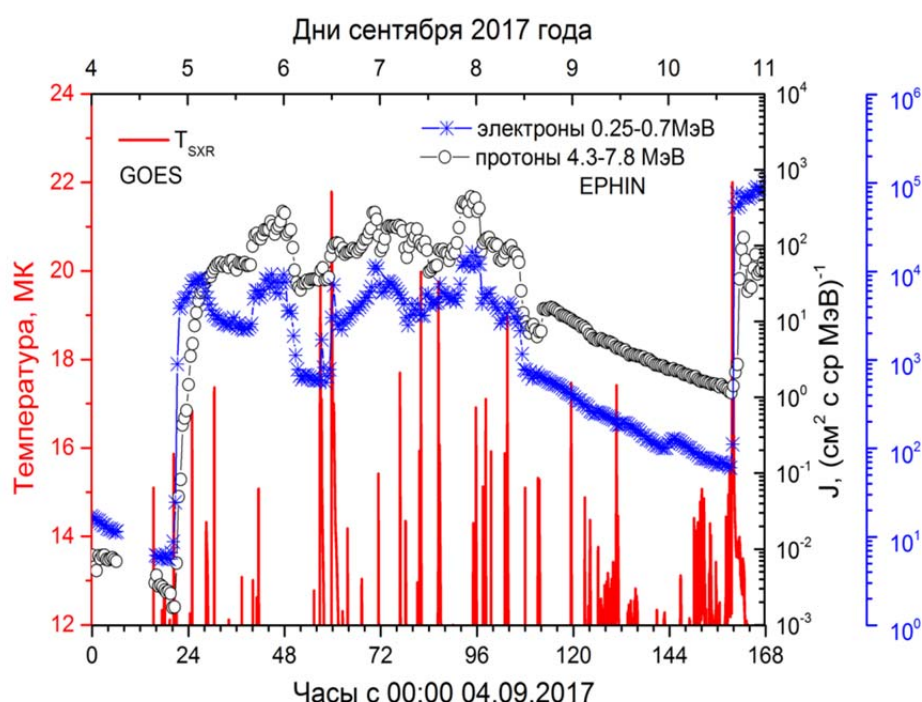


Рис. 1. Значения T_{SXR} (> 12 MK) GOES излучения вспышечной плазмы (верт. бары, лн. масштаб, слева ось Y), потоки релятивистских электронов и слабо ускоренных протонов (лог. масштаб, справа ось Y; время в hh, внизу ось X и вверху в dd (EPHIN, уср. 30 мин).

Ниже в таблице приведены вспышки [4], которые удовлетворяют хотя бы одному критерию «протонности» (выделены красным цветом). Чем большее выполненных критериев (красного в строке таблицы), тем выше шанс у вспышки-кандидата быть источником СПС. Радиоизлучение: во время SXR вспышки 15.4/8.8 ГГц свидетельствуют об излучении релятивистских электронов с $E > 100$ кэВ в магнитном поле, время (t) > 5 мин необходимо для ускорения протонов, которые при $t > 5$ мин дают возможность регистрировать γ -излучение. 245 МГц указывает на возбуждение плазменных колебаний (по-видимому, пучком ускорены электронов), $t > 5$ мин необходимо для ускорения протонов (> 5 мин) для возможной регистрации γ -излучения.

Таблица. Imp: дата, балл GOES SXR вспышки, №АО. X-ray, RSTN частоты 15.4/8.8 ГГц и 245 МГц (hhmm): время начала, пика, конца. ACS SPI: «нет» – нет данных / не зарегистрировано превышение над фоном от «х» – HXR вспышки, «р» – от протонов. KBM [5]: время (hhmm) 1-го появления в FOV LASCO_C2, средняя скорость ($V > 618$ км/с – для выхода в МП), угол направления PA (в градусах). Все времена в UT.

Imp, dd/mm	№АО, Координаты	X-ray, hhmm	15.4/8.8 ГГц $t > 5\text{min}$	245 МГц $t > 5\text{min}$	ACSSPI	KBM $V > 618$ км/с	II	IV- VII, CTM
04/09 M1.7	12673 S09W11	1846 1937 1952	1928 1929 1933	1900 1900 1900	нет	1900 597 240	нет	1908 /// ///
04/09 M5.5	12673 S10W11	2028 2033 2037	2030 2049 2114	нет	х + р +	2036 1418 Halo	2042 /// 2050	/// 2126
06/09 X2.2	12673 S08W32	0857 0910 0917	0900 0909 1050	нет	х + р -	нет	нет	нет
06/09 X9.3	12673 S09W34	1153 1202 1210	1154 1156 1351	1201 1203 1411	х + р +	1234 1571 Halo	1202 /// 1221	1201 /// 1515
07/09 M2.4	12673 S08W44	0459 0502 0508	0501 0502 0503	нет	х + р -	нет	нет	нет
07/09 M1.4	12673 S07W46	0949 0954 0958	0953 0953 0953	0953 0953 0953	х? р ?	нет	нет	0954 /// 1659
07/09 M7.3	12673 S07W46	1011 1015 1018	1014 1015 1016	1014 1014 1020	х + р ?	нет	нет	1013 /// 1018
07/09 X1.3	12673 S08W48	1420 1436 1455	1448 1448 1452	1448 1448 1448	х + р +	нет	нет	нет
07/09 M3.9	12673 S11W54	2350 2359 0014	2355 2356 2357	нет	х ? р ?	нет	нет	0000 /// 0431
08/09 C8.3	12673 S12W57	0531 0548 0553	0534 0534 0535	0546 0546 0547	х + р -	нет	нет	нет
10/09 X8.2	12673 S08W88	1535 1606 1631	1552 1558 1706	1553 1558 1604	х+ р+	1600 3163 262	1608 /// 1612	нет

Анти-совпадательная защита спектрометра на борту КА INTEGRAL (ACS SPI [6]) позволяет проследить связь между солнечным HXR излучением и протонным возрастанием, так как на одном приборе проверяется вспышечное HXR излучение с $E > 100$ кэВ и приход протонов с $E > 100$ МэВ на орбиту Земли. Поэтому зарегистрированные возрастания темпа счета ACS SPI сравнивались с вариациями потоков электронов 0.25–0.7 МэВ (пустые кружки) и протонов 4.3–7.8 МэВ (астерикс) в L1 (рис. 1) по данным EPHIN_SOHO [7]. Это единственный детектор релятивистских электронов, работающий вблизи Земли в настоящее время. Величина T_{SXR} (рис. 1) получена в пакете *SolarSoft* для GOES в каналах 0.5–4 Å и 1–8 Å. Об открытии коронального магнитного поля для выхода ускоренных частиц в МП свидетельствует KBM [5], связанный со вспышкой.

Подробный анализ всех солнечных вспышек C-X баллов GOES на диске (из отчетов NOAA [4]) в период 04-10.09.17 показывает:

- наиболее полный набор выполненных критериев у вспышек M5.5 4-го, X9.3 6-го и X8.2 10-го сентября, на их фоне наблюдались явные протонные возрастания ACS SPI. Черда вспышек 7-го числа M3.9, M7.3 и X1.3 с меньшим набором выполненных критериев, но показавшие в слабый отклик ACS SPI в одной из них (HXR > 100 кэВ: «x+» и протонное возрастание: «p+») могли дать вклад в потоки протонов, детекторами GOES и EPHIN;

- вспышки с еще меньшим набором критериев «протонности» (1/2 или меньше отмечено красным), но имеющие в поле ACS SPI «x +», «p ?/p- », указывают только на ускоренные вспышечные электроны с $E > 100$ кэВ в МП: X2.2 6-го, M2.4 7-го и C8.3 8-го числа.

Остальные вспышки не могли внести вклад в возрастания протонов и, таким образом, удержать плато в сигнале GOES и EPHIN. Несолнечные источники ускоренных частиц, отмеченные в каталоге СПС как SC (внезапное начало геомагнитной бури) могут давать вклад в возрастания протонов в этот период и подлежат исследованию. Интересны вспышки с $T_{\text{SXR}} > 12$ МК, но лишь $t > 2$ мин (фиолетовый шрифт), показавшие радиоизлучение на частотах < 245 МГц, всплески IV-VII, СТМ типов (M1.7 4-го, M1.4 7-го). Они могут быть источниками «молчащих» протонов в МП (с $E < 10$ МэВ), удерживающихся, по-видимому, в радиационных поясах.

Литература

1. <http://swxdev.sinp.msu.ru>
2. Григорьева И.Ю. и др. // Косм. Иссл., 2023, том 61, № 3, с. 230–241
3. Струминский А.Б. и др. // Геомагн. и Аэроном., 2023 (сдано в печать)
4. https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/NOAA/org_events_text/2017
5. https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/
6. <https://isdc.unige.ch/~savchenk/spiacs-online/spiacspnlc.pl>
7. <https://www2.physik.uni-kiel.de/SOHO/phpeph/EPHIN.html>