СОЛНЕЧНЫЕ СОБЫТИЯ 4–10 СЕНТЯБРЯ 2017 ГОДА: ПРОТОНЫ И ЭЛЕКТРОНЫ (I)

Григорьева И.Ю.¹, Струминский А.Б.²

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

²Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

SOLAR EVENTS ON SEPTEMBER 4–10, 2017: PROTONS AND ELECTRONS (I)

Grigorieva I.Yu.¹, Struminsky A.B.²

¹Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia

²Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Onset time of solar proton and electron events at the Earth orbit is important for determination of moment and sites of their acceleration at the Sun. A ratio of numbers of solar electrons to protons is an important characteristic of acceleration mechanism. Hard X-ray (HXR) emission of solar flares M5.5 on September 4, 2017 and X8.2 on September 10, 2017 – sources of solar protons and electrons in the interplanetary space. The ACS SPI detector is used as a detector of relativistic protons. Onset times of relativistic solar electron event (EPHIN SOHO) and solar proton event (ACS SPI) near the Earth are considered. Light curves of HXR intensity and temporal profiles of solar proton and electron intensities are compared relatively a chosen zero time – onset of radio emission at 15.4 GHz. From solar and interplanetary observations we got evidences of existence of two phases and two accelerations mechanisms operating in the solar flares of September 4 and 10, 2017.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-123-126

Ускорение заряженных частиц является фундаментальным свойством солнечных вспышек. Начиная с работы [1], появляется все больше свидетельств того, что собственно вспышку можно разделить, по крайней мере, на две фазы, в которых, по-видимому, работают принципиально разные физические механизмы ускорения. В первой фазе ускоряются преимущественно электроны, а во второй фазе преобладают протоны [2–5]. Этот факт находит свое подтверждение и в межпланетной среде, где наблюдаются как электронные, так и протонные события [6–9].

Механизм ускорения, работающий во второй фазе, может быть связан как с ускорением на ударных волнах корональных выбросов массы (Coronal Mass Ejection, CME) [10], так и в системе после вспышечных петель (постэруптивное ускорение [11]). Спор о роли вспышек и ударных волн CME продолжается [12]. Время первого прихода солнечных электронов и протонов на Землю важно для определения момента и места их ускорения на Солнце, а соотношение между числом ускоренных протонов и электронов является важной характеристикой солнечных ускорителей.

Антисовпадательная защита спектрометра на ИНТЕГРАЛе (ACS SPI) регистрирует фотоны с энергией более 150 кэВ. В момент солнечных вспышек с HXR излучением ACS SPI регистрирует первичные солнечные фотоны. Благодаря вытянутой эллиптической орбите КА и большой массе детектора, ACS SPI зачастую оказывается единственным инструментом, зарегистрировавшим солнечное HXR излучение. В данной работе для получения информации о солнечном HXR излучении мы будем использовать, как данные ACS SPI (<http://isdc.unige.ch/~savchenk/spiacs-online/spiacs.pl>), так и данные RHESSI.

В случае прихода к Земле солнечных космических лучей ACS SPI регистрирует вторичные фотоны, рожденные солнечными протонами. В некоторых событиях ACS SPI оказывается более чувствительным детектором протонов, чем нейтронные мониторы (НМ) [13]. Здесь мы используем ACS SPI, как некалиброванный детектор релятивистских протонов. Данные по потокам релятивистских электронов дает детектор EPHIN SOHO (<http://www2.physik.uni-kiel.de/SOHO/phpeph/EPHIN.htm>).

Характеристики рассматриваемых событий представлены в таблице. Данные событий взяты с сайта (<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/events/>), по CME (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/). Времена (мин) в таблице даны относительно начала радиоизлучения на 15.4 ГГц в каждом событии. А – дата, нулевое время, балл вспышки, Б – начало и максимум вспышки мягкого рентгеновского излучения (SXR) по GOES; В – время максимума температуры, время запаздывания максимума мера эмиссии относительно максимума температуры; Г – время первого появления CME(LASCO C2) и его скорость км/с; Д – время и величина максимума излучения на 15.4 ГГц (СЕР); Е – время начала радио всплесков III, II и IV типов; Ж – время начала роста вторичных частиц ACS SPI/электронов SOHO EPHIN 2.64–6.12 кэВ от первой/второй фазы вспышки.

Таблица.

А	Б	В	Г	Д	Е	Ж
04.09.2017 20:43 M5.5	-2/+3	-11/2	-7 1418	+6 360	?/-1/-95	+27/нет/+15
06.09.2017 09:00 X2.2	-3/+10	+9/2	нет	+9 1400	?/?/?	нет/+6/нет
06.09.2017 11:54 X9.3	-1/+8	+3/6	+30, 1571	+2 8100	+3/+8/+7	+25/+3/+35
10.09.2017 15:52 X8.2	-20/+11	+5/10	+8, 3163	+6 21000	+2/+16/+1	+25/+4/+16

Здесь мы ограничимся обсуждением событий 4 и 10 сентября 2017 г., где удалось зарегистрировать HXR (RHESSI). События 6 сентября 2017 г. с доступными данными по радиоизлучению обсуждаются в [14].

Вспышка M5.5 4 сентября 2017 года примечательна тем, что в ней наблюдалось два HXR всплеска, разнесенных во времени (рис. 1, левая па-

нель). Причем, второй всплеск наблюдался на фазе спада SXR и характеризовался более жестким спектром. В первом всплеске RHESSI регистрировал HXR только до 50 кэВ, при этом не наблюдалось радиоизлучение на 15.4 ГГц (см. таблицу). Это событие напоминает событие 26 октября 2003 года, рассмотренное в работе [15]. Данные на рисунке 1 показывают, что именно второй всплеск HXR был источником длительного электронного и протонного события в межпланетной среде. Традиционные детекторы протонов в это время возрастания интенсивности не показывали. Релятивистские электроны и протоны должны были быть ускорены во второй фазе вспышки, возможно, при формировании аркады петель после вспышки. Это ускорение не было связано с СМЕ, так как выброс находился на высоте более 4 радиусов Солнца. Электроны с мягким спектром, ускоренные в первом HXR всплеске, по всей видимости, не вышли в межпланетное пространство или их интенсивность была ниже фона.

Рис. 1.

Вспышке X8.2 и протонному событию 10 сентября 2017 г. посвящено много работ [16–19], где получены достаточно противоречивые результаты. Здесь мы хотим подчеркнуть, что наблюдаемое HXR излучение было типичным для события, сопровождавшегося солнечными протонами в межпланетном пространстве, то есть выполнялся закон Киплингера «soft-hard-harder» [20]. Это видно на левой панели рисунка 2 при сравнении данных RHESSI и ACS SPI. Электроны наблюдались детектором EPHIN SOHO от каждого этапа Киплингера «soft-hard-harder».

Протоны, ответственные за анизотропное GLE [16], пришли на Землю одновременно с релятивистскими электронами, ускоренными во второй фазе вспышки одним и тем же механизмом ускорения (рис. 2, правая панель). Ускорение протонов до релятивистских энергий в фазе вспышки “harder” – после 5 мин согласуется наблюдением гамма-излучения детектором Fermi/LAT [19]. До 14–15 мин наблюдалось чисто электронное событие. Протоны меньших энергий, которые могли ускоряться в первой фазе вспышки, могли прийти значительно позднее релятивистских протонов, поэтому их трудно выделить на общем фоне.

Рис. 2.

Таким образом, получены свидетельства существования двух фаз и двух механизмов ускорения во вспышках 4 и 10 сентября 2017. Вблизи Земли 4 сентября были зарегистрированы только солнечные протоны и электроны, ускоренные во второй фазе вспышки M5.5, а 10 сентября были зарегистрированы как электроны от первой фазы вспышки, так протоны и электроны от второй фазы вспышки X8.2. Как и ожидалось, первая фаза вспышек характеризовалась мягким спектром HXR, а вторая фаза более жестким спектром HXR. События от вспышек X2.2 и X9.3 6 сентября 2017 рассмотрены авторами во второй работе [14] в настоящем сборнике.

Работа Григорьевой И.Ю. поддержана субсидией по программе «Энерговыделение», Струминским А.Б. – субсидией по программе «Плазма».

Литература

1. Wild, J.P., Smerd, S.F., Weiss, A.A. // Ann. Rev. Astron. Astrophys., 1963, v. 1, p. 291.
2. Frost K.J., Dennis B.R. // ApJ, 1971, 165:655-659.
3. Bai, T., and Ramaty, R. // Solar Phys., 1976, v. 49, p. 343.
4. Ramaty, R., Murphy, R.J., Dermer, C.D. // ApJ, 1987, v. 316, p. L41.
5. Shih, A.Y., Lin, R.P., Smith, D.M. // ApJ, 2009, v. 698, p. L152.
6. Ramaty, R., Colgate, S.A., Dulk, G.A., et al. // 1978, Chapter 4 in the proc. of the 2nd SKYLAB Workshop on Solar Flares, pp. 117-185, ed. P.A. Sturrock.
7. Cane, H.V., McGuire, R.E., von Rosenvinge, T.T. // ApJ, 1986, vol. 301, p. 448.
8. Cane, H.V., Richardson, I.G., von Rosenvinge, T.T. // JGR, 2010, V. 115, A8, A08101.
9. Cliver, E.W. // ApJ, 2016, 2016832:128 (8 pp).
10. Cliver, E.W. // 2009, Proc. IAU Symp., v. 257, p. 401.
11. Chertok I.M. // 1995, 24th ICRC, v. 4, p.78.
12. Мирошниченко, Л.И. // УФН, 2018, т. 188б с. 345.
13. Struminsky, A. and Zimovets, I. // 2009, 21st ECRS, Slovak Academy of Sciences. p. 237.
14. Григорьева, И.Ю., Струминский, А.Б. Солнечные события 4–10 сентября 2017 года: радиоизлучение II–IV типов (II) // 2018, в этом сборнике.
15. Zimovets, I. and Struminsky A. // Solar Phys., 2012, V. 281, p.749.
16. Kurt V., Belov A., Kudela K, et al. // Contrib. Astron. Obs. Skalnat'e Pleso, 2018, v. 35. p. 1.
17. Gopalswamy, N., Yashiro, S., Makela, P., et al. // ApJ, 2018, v. 863, id. L39, 6 pp.
18. Gary, D.E.; Chen, B.; Dennis, B.R.; et al. // ApJ, 2018, v. 863, id. 83, 9 pp.
19. Omodei N., Pesce-Rollins M., Longo, F., et al. // ApJ, 2018, v. 865, id. L7, 6 pp.
20. Kiplinger, A. // ApJ, 1995, 453, 973.