ПРОТОННЫЕ ВСПЫШКИ С НЕВЫРАЖЕННОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ФАЗОЙ

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

PROTON FLARES WITH UNPRONOUNCED IMPULSIVE PHASE

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 Radio

The western flares on December 26, 2001 (M7.1), May 17, 2012 (M5.1) and the eastern one on September 22, 2011 (X1.4) are studied, which had an unpronounced impulsive phase in SXR emission and were accompanied by SEP-events near the Earth. These western flares do not satisfy the statistical dependence between their μ -emission intensity and large proton fluxes in the interplanetary space. This dependence, most likely, would also not fit the eastern flare if it had been (or an observer) in a favorable location for SEP observations. For the events on December 26, 2001 and May 17, 2012: 1) the flux intensities and instant fluences of μ -emission, the fluxes of solar electrons and protons near the Earth were analyzed; 2) it was obtained that instant fluences, which are independent on the event duration, and the observed fluxes of electrons and protons are consistent with each other; 3) the observed onset of solar relativistic electrons indicates their long-term and gradual acceleration; 4) simultaneous observation of electron and proton intensities with similar time profiles also indicates their acceleration by the same physical process. The similarity of the characteristics of all three flares indicates the realization of a scenario of stochastic acceleration of electrons and protons during them.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-123-126

Исследуются вспышки 26.12.2001 (M7.1), 17.05.2012 (M5.1) и 22.09.2011 (X1.4) с постепенным ростом мягкого рентгена (SXR, GOES данные) и сопровождавшие их события солнечных космических лучей (СКЛ) вблизи Земли. Выбранные три вспышки обладают невыраженной импульсной фазой в мягком рентгеновском (SXR) излучении (нет корреляции между нетепловым и SXR-излучением). Под импульсной фазой обычно понимают время наблюдения жесткого рентгеновского (HXR) и микроволнового (μ -)излучения до максимума SXR-излучения.

Во многом эти вспышки схожи с теми, которые рассматривались ранее в [1]. Тогда авторы обратили внимание на длительные вспышки со слабой импульсной фазой в микроволнах, но сопровождавшиеся большими потоками протонов в межпланетной среде. Эту особенность они связы-

вали с развитием вспышечного процесса в высокой петле с большим пробочным отношением. В работе [2], обсуждается существование двух типов длительных вспышек, различающихся по проявлению ускоренных частиц в межпланетной среде.

Авторами работы [3] обнаружена зависимость между флюенсами на 35 ГГц (NoRP, Nobeyama) и флюенсами солнечных протонов >100 МэВ около Земли в событиях 1990–2012 годов, которая говорит в пользу ускорения частиц во вспышках. Однако ими было замечено и 4 события с малым μ -излучением относительно количества зарегистрированных протонов (аналогично [1]), являющиеся исключением из этой зависимости. В работе [4] подобные случаи интерпретировались как однозначное свидетельство ускорения частиц на ударных волнах. Одно событие из них (M7.1, 26.12.01) подробно исследовалось в [5] (и ссылки там), где авторы дали еще аргументы вспышечного происхождения солнечных протонов.

Длительное событие 26.12.01 (M7.1) состояло из двух последовательных вспышек, 1-ая развивалась с 04:32UT и до $\sim 05:04$ UT, а 2-ая после этого времени [5]. Ниже все временные профили построены относительно 0-времени. За 0-времени в 26.12.01 взято начало 2-ой вспышки, а в остальных случаях – начало излучения на 15.4 ГГц согласно списку солнечных событий (<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/events/>). Ноль времени 26.12.01 совпадает с резким началом роста интенсивности на 15.4 ГГц (рис. 1в). Отметим, что наши события (17.05.12 [6] и 26.12.01), оказались двумя из 4х случаев несоответствия в [3], а протонное событие 22.09.11 ранее никем не рассматривалось.

На рис. 1 приведены временные профили температуры (T , МК; рис. 1а) и меры эмиссии (EM , 10^{49} см^{-3} ; рис. 1б) изучаемых событий в сравнении с мощной импульсной вспышкой 09.08.11 (X6.9) [7]. Для трех событий с невыраженной импульсной фазой характерно отсутствие резкого роста T и EM , по сравнению со вспышкой X6.9 (штриховая кривая, рис. 1), также отметим большую задержку максимума EM относительно максимума T . Максимум SXR-излучения в них обусловлен не сильным нагревом излучающей плазмы, а ее большой EM , которая связана с заполнением большого объема множеством постэруптивных петель. По нашим оценкам в этих событиях KBM произошел до +10 минуты.

Во вспышках с невыраженной импульсной фазой в μ -излучении характерен продолжительный всплеск на 15,4 ГГц (RSTN; рис. 1 в, г), <ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/space-weather/solar-data/solar-features/solar-radio/>. Причем максимальная интенсивность 17.05.12 была примерно в 5 раз меньше других. Излучение корональной плазмы на 245 МГц было сравнимо по интенсивности и показывало, что вспышечные процессы развивались от хромосферы до нижней короны (<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/events/>).

Рис. 1. Временные профили во вспышках 22.09.11 (X1.4), 26.12.01 (M7.1), 17.05.12 (M5.1) и 09.08.11 (X6.9): а) температура T (МК) и б) мера эмиссии EM (10^{49} cm^{-3}) по GOES; г) поток и д) мгновенные флюенсы на 15.4 ГГц по RSTN.

Мгновенные флюенсы μ -излучения на 15.4 ГГц показаны на рис. 1в. Для их расчета мы складывали 1 сек. интенсивности, вычитая на каждом шаге предвспышечный фон для каждого события. В этом случае видны моменты начала и завершения накопления флюенса, и нет необходимости определять длительность каждого события. Мгновенные флюенсы 15.4 ГГц различаются не столь драматично, как интенсивности. Причем мгновенный флюенс 17.05.12 больше, чем в двух других событиях, вплоть до $\sim +15$ минуты. Мгновенный флюенс 26.12.01 становится наибольшим после $\sim +20$ мин., что соответствует возрастанию μ -потока интенсивности сопоставимой с основным всплеском 17.05.12. Из анализа потоков и флюенсов μ -излучения следует, что ускорение электронов до релятивистских энергий продолжалось более 20 минут, т.е. во вспышках было длительное постэруптивное ускорение.

Согласно [8], выбор того или иного механизма ускорения определяется возможностью ускорять электроны до энергий 10 МэВ, а протонов до 100 МэВ. Ударные волны способны ускорять протоны до энергий >100 МэВ, но не электроны до релятивистских энергий [8]. Если протоны и электроны наблюдаются одновременно и их временные профили подобны, то реализуется один из вариантов стохастического ускорения [9]. Обратимся к наблюдениям солнечных электронов (EPHIN/SOHO: <http://www2.physik.uni-kiel.de/SOHO/phpeph/EPHIN.htm>); и протонов (GOES https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/NOAA/particle/) вблизи Земли 26.12.01 и 17.05.12 (рис. 2). Восточное событие 22.09.11 прокомментируем в конце.

Возрастания потоков релятивистских электронов (без фона) в трех дифференциальных энергетических каналах EPHIN/SOHO показаны на рис. 2а. Возрастания потоков протонов в интегральных каналах GOES показаны на

рис. 2б. Видно, что интенсивности электронов и протонов были большими в 17.05.12 примерно с +20 по +60 мин, а интенсивности 26.12.01 становятся большими только после +60-(+80) минут. Это согласуется с соотношением мгновенных флюенсов на 15.4 ГГц (рис. 1в).

Рис. 2. Временные профили потоков солнечных электронов (а) данные SOHO/EPHIN и протонов (б) данные GOES, зарегистрированных вблизи Земли.

Электроны меньших энергий приходили на Землю одновременно или раньше, чем больших энергий (рис. 2а), т. е. они были инжектированы в межпланетную среду заведомо раньше. Это возможно только в том случае, если ускорительный процесс был длительным, а максимальная энергия электронов постепенно увеличивалась, что согласуется с картиной стохастического ускорения [9].

Данные GOES показывают аномально большое возрастание для восточной вспышки (X1.4) 22.09.11 только с 23 по 26 сентября (поэтому их нет на рис.2). Однако эта вспышка могла бы быть источником одного из самых мощных электронных и протонных событий 24 цикла, окажись она в оптимальном долготном интервале для распространения солнечных ускоренных частиц до Земли.

Работа, выполненная Григорьевой И.Ю. (ГАО РАН) осуществлена за счет субсидии программы «Энерговыделение» и частично поддержана Программой Президиума РАН, Струминским А.Б. (ИКИ РАН) – за счет субсидии программы «Плазма» и Шаховской А.Н. (КрАО РАН) – за счет субсидии программы «Общие и локальные характеристики Солнца».

Литература

1. E.I. Daibog, V.F. Melnikov, and V.G. Stolpovskii // Sol. Phys., 1993, vol. 144, p. 361.
2. А.Б. Струминский, Ю.И. Логачев, И.Ю. Григорьева и др. Два типа длительных вспышек: солнечные протоны и релятивистские электроны // 2019 (этот сборник).
3. V.V. Grechnev, V.I. Kiselev, N.S. Meshalkina, et al. // Sol. Phys., 2015, vol.290, p.2827.
4. Cliver, E.W. // ApJ, 2016, vol. 832, id: 128 (8 pp).
5. V.V. Grechnev, V.I. Kiselev, A.M. Uralov, et al. // Sol. Phys., 2017, vol. 292, p. 102.
6. C. Li, Kazi A. Firoz, L.P. Sun, et al. // ApJ, 2013, vol. 770, id:34 (11pp).
7. И.Н. Шарыкин, А.Б. Струминский, И.В. Зимовец // ПАЖ, 2015, 41, 57.
8. Miller J.A., Cargill P.J., Emslie A., et al. // J. Geophys. Res., 1997, vol. 102, p. 14631.
9. Струминский А.Б., Григорьева И.Ю., Логачев Ю.И. и др. // Физика Плазмы, 2020.