УСКОРЕНИЕ КВМ В НИЖНЕЙ КОРОНЕ В ИМПУЛЬСНЫХ ВСПЫШКАХ И СОЛНЕЧНЫЕ ЭНЕРГИЧНЫЕ ЧАСТИЦЫ

**Струминский А.Б.¹, Григорьева И.Ю.²,
Логачев Ю.И.³, Садовский А.М.¹**

¹*Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

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

³*МГУ им. М.В. Ломоносова, НИИЯФ им. Д.И. Скобелева, Москва, Россия*

CME ACCELERATION IN LOW CORONA IN IMPULSIVE FLARES AND SOLAR ENERGETIC PARTICLES

**Struminsky A.B.¹, Grigorieva I.Yu.²,
Logachev Yu.I.³, Sadovskii A.M.¹**

¹*Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Central Astronomical Observatory of Russian Academy of Sciences, St.-Petersburg, Russia*

³*Lomonosov Moscow State University Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, Russia*

Three eruptive solar flares are considered: X9.7 (S18W63) 06.11.1997, X6.9 (N17W69) 09.08.2011, and X1.1 (S13W59) 06.07.2012. In the impulsive phase of these flares with a duration of less than ~5 min (from the onset of μ -emission at 15.4 GHz to the maximum of soft X-ray (SXR) radiation), bursts of hard X-ray (HXR) and μ -radiation with a large amplitude and duration of less than ~1 min were observed. At the time of these bursts, effective heating and evaporation of the chromospheric plasma appeared, which was expressed in a short (less than ~2 min) time delay of the maximum of the emission measure relative to the maximum of the temperature of the flare plasma. A comparable acceleration of coronal mass ejections (CMEs) occurred during the impulsive phase leading to comparable average velocities. The maximum intensities of electron and proton fluxes in the interplanetary medium did not correlate with the characteristics of CME, SXR, HXR, and μ -radiation. Bursts of non-thermal radiation in the impulsive phase and the CME shock wave were only indirectly related to the acceleration of solar protons and relativistic electrons.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-277-280

Последние результаты по кинематике корональных выбросов массы (КВМ) и ускорению частиц в событиях 13.05. 2013 [1] и 10.09.2017 [2–4] позволяют по-новому взглянуть на аналогичные процессы в других событиях. Быстрый процесс ускорения КВМ с величиной, близкой к предельной (~ 10 км/с² [5]), может продолжаться как с меньшей величиной, но большей длительностью [1], так и с замедлением [2–3]. При этом наиболее эффективное ускорение электронов происходило в этих событиях после достижения КВМ более 1.5 радиусов Солнца, т.е. на постэруптивной фазе [1, 4]. Отметим, что в работах [2, 6] ускорение протонов до релятивистских энергий связывают с большой величиной ускорения КВМ, т.е. быстрым формированием ударной волны. Альтернативой ускорению на ударных

волнах является стохастическое ускорение протонов в аркаде послевспышечных петель под KBM [4].

Для анализа мы выбрали три мощные импульсные вспышки: X9.7 6 ноября 1997 (тонкая черная линия, кружки), X6.9 9 августа 2011 (толстая серая линия, квадраты) и X1.1 6 июля 2012 (толстая черная линия, треугольники), см. таблицу и рис. 1. В межпланетном пространстве (МП) они сопровождалась быстрыми KBM (>1500 км/с), солнечными протонами >100 МэВ и релятивистскими электронами. Событие 6 ноября 1997, которое сопровождалось еще и наземным возрастанием интенсивности космических лучей (GLE), – первый и последний пример наблюдения KBM коронографом LASCO_C1 без предварительного ускорения [7]. Вспышка 9 августа 2011 интересна своей экстремальной температурой [8], а 6 июля 2012 – величиной всплеска в жестком рентгеновском (HXR) диапазоне [9], в них обеих Fermi/LAT наблюдал длительное γ -излучение >100 МэВ [9].

Данные событий взяты с сайта (<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/events/>), по KBM (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/). Температура (T) и мера эмиссии (EM) вспышечной плазмы рассчитаны в пакете *SolarSoft*. 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 в мягком рентгене (SXR, GOES); **В** – время максимума T , время запаздывания максимума EM относительно максимума T ; **Г** – время первого появления KBM (LASCO_C2) и его скорость в км/с; **Д** – наименьшая частота регистрируемого радиоизлучения (RSTN), времена его начала и максимума; **Е** – время и величина максимума излучения на 15.4 ГГц (с.е.п.); **Ж** – время начала радио всплесков III, II и IV типов; **З** – время начала роста 5 мин средних потоков протонов >100 МэВ (GOES), электронов 2.64–6.12 кэВ (1 мин, SOHO/EPHIN) для первой и второй фазы ускорения [4]. Данные электронных каналов детектора EPHIN/SOHO взяты здесь: <http://www2.physik.uni-kiel.de/SOHO/phpeph/EPHIN.htm>, интегральных протонных каналов GOES взяты тут: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/NOAA/particle/.

Таблица.

А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З
06.11.1997 1151 X9.7 S18W63	-2/+4	+3/2	+19/1556	245 -2/+2	0/+2 9800	?/?/+1	+24 +2/+28
09.08.2011 0801 X6.9 N17W69	-5/+5	+2/2	+11/1610	245 -1/+1	0/+2 1600	+16/0/+19	+14 +3/+14
06/07/12 2303 X1.1 S13W59	-2/+5	+4/2	+21/1828	245 +2/+3	0/+3 1900 (8.8)	+1/+6/+19	+40 +2/+29

Рис. 1.

Согласно [10] импульсной фазой считают время наблюдения HXR и микроволнового (μ -) излучения до максимума SXR излучения, т.е. до ~ 5 мин в рассматриваемых событиях. На рис. 1 показаны временные профили: А – EM ; В – T ; С – μ -излучения на 8.8 ГГц. Значки на рис. 1С показывают положение KBM по данным LASCO, серая и черная стрелки – аппроксимацию положения KBM по двум первым квадратам и треугольникам. Два первых перечеркнутых кружка соответствуют наблюдениям LASCO_C1, согласно [7] скорость составляла 2150 км/с, а ускорение было 7.3 км/с^2 . Ускорение KBM в двух других событиях могло быть таким же с учетом возможных ошибок (рис. 1С).

Авторы работ [11–12] обратили внимание на то, что условия нагрева вспышечной плазмы нетепловыми электронами меняются с началом пост-эруптивной фазы. При наличии оттока плазмы и увеличения EM падает SXR излучение [11] и эффективная T [12], несмотря на потоки нетеплового излучения сопоставимые с теми, что наблюдались на фазе роста SXR и T . Наблюдения эрупции LASCO_C1 06.11.1997 позволяют уточнить начало постэруптивной фазы (рис. 2). На рис. 2 сравниваются $\frac{dT}{dt}$ (А) и $\frac{dEM}{dt}$ (В) с μ -излучением на 15.4 ГГц (серая линия). Интенсивность SXR $J(T, EM) \sim F(T) \times EM$, а $\frac{dJ}{dt} = EM \times \frac{dF}{dT} \frac{dT}{dt} + F \times \frac{dEM}{dt}$. Монотонный рост $\frac{dT}{dt}$ без изменения EM наблюдается до +1 мин (в 11:52:13 UT фронт KBM не виден [7]), далее во время первого пика на 15.4 ГГц – три коротких всплеска $\frac{dT}{dt}$, которые инициировали быстрый рост $\frac{dEM}{dt}$ – импульсное развитие KBM. Постэруптивная фаза (второй пик на 15.4 ГГц) началась после +2 мин и соответствовала увеличению EM без нагрева.

Рис. 2.

Максимальные интенсивности потоков электронов и протонов в МП в этих событиях не коррелировали с характеристиками КВМ, SXR, HXR μ -излучения, наблюдения будут подробно представлены в [14]. Таким образом, всплески нетеплового излучения в импульсной фазе и ударная волна КВМ имели только косвенное отношение к ускорению солнечных протонов и большинства релятивистских электронов. Релятивистские электроны и протоны длительно стохастически ускорялись на постэруптивной фазе всплеска уже после максимального ускорения КВМ.

Работа была поддержана субсидиями по темам «Плазма» (АБС и АМС) и «Энерговыделение» (ИЮГ), грантом РФФИ –19-02-00264 (ЮИЛ).

Литература

1. Gou T., Veronig A.M., Liu R., et al. // *Astrophys. J.*, 2020, v. 897, p. L36.
2. Gopalswamy N., Yashiro S., Mäkelä P., et al. // *Astrophys. J.*, 2018, v. 863, p. L39.
3. Veronig A.M., Podladchikova T., Dissauer K., et al. // *Astrophys. J.*, 2018, v. 868, p. 107.
4. Струминский А.Б., Григорьева И.Ю., Логачев Ю.И. и др. // *Физика Плазмы*, 2020, т. 46, с. 139.
5. Green L.M., Török T., Vršnak B., et al. // *Space Sci. Rev.*, 2018, v. 214, p. 46.
6. Gopalswamy N., Yashiro S., Thakur N., et al. // *Astrophys. J.*, 2016, v. 833, p. 216.
7. Zhang J., Dere K. P., Howard R. A., et al. // *Astrophys. J.*, 1999, v. 559, p. 452.
8. Шарыкин И.Н., Струминский А.Б., Зимовец И.В. // *Письма в АЖ*, 2015, т. 41, с. 57.
9. Struminsky A. and Gan W. // *J. Phys: Conf. Ser.*, 2015, v. 632, id. 012081.
10. Benz A. // *Living Rev. Solar Phys.*, 2017, v. 14, id. 2 (59 pp).
11. Струминский А.Б. и Зимовец И.В. // *Письма в АЖ*, 2008, т. 34, с. 777.
12. Струминский А.Б. и Зимовец И.В. // *Письма в АЖ*, 2010, т. 36, с. 453.
13. Maia D., Vourlidas A., Pick M., et al. // *J. Geophys. Res.*, 1999, v. 104, p. 12507.
14. Струминский А.Б., Григорьева И.Ю., Логачев Ю.И. и др. // *Изв. РАН*, 2021, сер. физ., сдана в печать.