ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЕ ВСПЫШКИ X5.4 И X1.3 7 МАРТА 2012 И СОПРОВОЖДАВШИЕ ИХ КОРОНАЛЬНЫЕ ВЫБРОСЫ МАССЫ

Струминский А.Б.¹, Григорьева И.Ю.²

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

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

CONSEQUENT FLARES X5.4 AND X1.3 ON MARCH 7, 2012 AND CORONAL MASS EJECTIONS ACCOMPANIED THEM

Struminsky A.B.¹, Grigoryeva I.Yu.²

¹Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia

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

The absence at the current moment (October 25, 2021) of new powerful solar flares allows us to once again draw attention to the significant events of the past 24th solar cycle. These certainly include a pair of X5.4 and X1.3 flares on March 7, 2012, which occurred in the same active region with a delay of about one hour. They were accompanied by prolonged (more than 18 hours) >100 MeV γ -radiation. Each of this pair was accompanied by its own fast coronal mass ejection (CME) >1800 km/s. The X1.3 flare is notable for small changes in the intensity of soft X-ray radiation (SXR), temperature and emission measure of the emitting plasma, despite the intensity of the hard X-ray radiation (HXR) at maximum comparable to that in the flare X5.4. An analysis of the observations shows: 1) the larger X-ray class X5.4 of the first flare is associated with chromospheric evaporation into low coronal loops; 2) the absence of the observed chromospheric evaporation in the second flare X1.3 can be explained by the presence of only high coronal loops left after the first flare; 3) in both flares, the main acceleration of the CME occurred up to the maxima of the HXR bursts; 4) in both flares, relativistic electrons and protons were accelerated stochastically at the post-eruptive phase.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-261-264

В течение одного часа 7 марта 2012 в активной области AR11429 с координатами N16E30 произошли две яркие эруптивные вспышки X-класса. Они сопровождались γ -излучением >100 МэВ с рекордной длительностью (>16 часов), которое было зарегистрировано телескопом LAT/FermiGRO [1]. Первая вспышка X5.4 началась в 00:02 UT и достигла максимума интенсивности в 00:24 UT, вторая началась на фоне спада предыдущей в 01:05 UT и достигла максимума X1.3 (M7.0 после вычитания фона [2]) через 9 минут. Вспышки продолжались ~ 38 и ~ 18 минут, соответственно. Согласно информации в [2], сопровождавшие их КВМ достигли средних скоростей ~ 2700 и ~ 1800 км/с, начав ускорение за несколько минут до пиков HXR излучения, на ~ 17 и ~ 8 мин раньше радиоизлучения II типа. Информация о жестком рентгеновском излучении (HXR) излучении за время этих вспышек доступна только с борта КА INTEGRAL [3], так как КА RHESSI не наблюдал Солнце в это время.

В работе [4] было замечено, что пара вспышек 7 марта 2012 своим соотношением между наблюдаемыми максимальными интенсивностями SXR (X5.4 и X1.3) и сопоставимыми по величине максимумами в HXR излучении (Anti-Coincidence Shield of the Spectrometer on INTEGRAL-ACS SPI) напоминают явление «BOT – burst on tail» [5]. Это свидетельствует о взаимодействии ускоренных электронов в «BOT» в новых физических условиях. Согласно интерпретации [5], на фазе SXR спада длительной вспышки 26 октября 2003 «хромосферное испарение» происходило в значительно более высокие петли, чем в импульсной фазе. Ускорялись ли протоны в «BOT» непонятно, ввиду отсутствия наблюдения γ -излучения.

Здесь мы хотим понять, в чем состоят возможные сходства и различия вспышек и KBM 7 марта 2012 между собой. Также интересно провести сравнение с наблюдениями вспышки X2.8 и KBM 13 мая 2013 [2, 6]. В работе [6] были получены новые и неожиданные результаты по кинематике KBM и его связи с нетепловым излучением этой солнечной вспышке. Впервые было показано, что KBM был ускорен в двух различных фазах: импульсной, с максимальной величиной ускорения $\sim 5 \text{ км/с}^2$, и длительной, с величиной ускорения до 0.7 км/с^2 . Две фазы ускорения KBM соответствовали двум эпизодам выделения энергии: 1) обычной эрупции магнитного волокна, 2) постэруптивному энерговыделению в петлях большого масштаба и ускорению частиц, генерирующих нетепловое рентгеновское и γ -излучение [2]. Вспышка X2.8 13 мая 2013 года также сопровождалась γ -излучением $>100 \text{ МэВ}$ [2]. Сравнение, проводимое в данной работе, позволит понять, применимы ли выводы [6] для вспышек и KBM 7 марта 2012.

Мы рассматриваем три события в единой шкале времени (рис. 1А) относительно выбранного нуля: 1) 00:11 UT для X5.4 7 марта 2012; 2) 01:05 UT – начало вспышки X1.3 7 марта 2012; 3) 15:51 UT 13 мая 2013 – начало радиоизлучения на 15.4 ГГц (RSTN). При таком выборе нуля во всех трех событиях вблизи 0 мин начинается рост HXR излучения ($>150 \text{ кэВ}$) – темпа счета ACS SPI, ускорение KBM должно было начаться между 0 и (+5) мин согласно линейной аппроксимации (рис. 1А). Отметим, что максимальные интенсивности и времена максимумов HXR излучения в трех событиях близки (рис. 1А). Тонкая серая штриховая линия – темп счета ACS SPI во второй вспышке 7 марта 2012 относительно фона перед первой, тонкая серая сплошная – относительно собственного фона. Аналогично [7] мы рассматриваем временные зависимости производных температуры $dT(t)/dt$ и меры эмиссии $dEM(t)/dt$ вспышечной плазмы (рис. 1В-Д), которые позволяют судить о нагреве вспышечной плазмы, о «хромосферном испарении» и его влиянии на развитие вспышек и KBM.

Для восстановления положения KBM до его первого появления в поле зрения коронографа LASCO C2 ($1.5\text{--}6 R_s$) мы применяем метод сшивки предполагаемого равноускоренного и наблюдаемого равномерного движе-

ния [7]. Мы не применяем этот метод для КВМ после вспышки X1.3, который наблюдался только LASCO C3 (3.7–30 R_s).

Рис. 1.

Предположим, что КВМ движется из положения $R_0 = 1.25R_s$ в момент t_0 с начальной скоростью $V_0 = 0$ и ускорением $a = const$ до момента t . После момента t КВМ движется со скоростью $V = const$, которая известна из наблюдений коронографа LASCO. Так как $R = A + Bt$, $V_{12} = B$, $a_1 = B/(t-t_0)$, то из условия сшивки равноускоренного и равномерного движений находим $t = (2R_0 - 2A - Bt_0)/B$. Результаты вычислений представлены ниже.

Таблица.

Дата, время	t_0 с	A км	B км/с	t с	a_1 км/с ²	t_3 с	V_{23} км/с	a_2 км/с ²	V_{20R_s} км/с
07.03.12 00:11 UT	0	-705556	2988	1054	2.8	1865	3394	0.5	2594
	240			814	5.2			0.4	
13.05.13 15:51 UT	0	-237758	2484	892	2.8	1985	2288	-0.16	1723
	270			622	7			-0.14	

Нижние индексы при V обозначают, какие последовательные положения КВМ были использованы для линейной экстраполяции – (первое и второе (1 и 2), или второе и третье (2 и 3)). Мы видим, что $V_{23} > V_{12}$ в X5.4 7 марта 2012 и КВМ ускорялся, но $V_{23} < V_{12}$ в X2.8 13 мая 2013 и КВМ замедлялся, вблизи третьего положение. Оценка величины ускорения между моментами t и t_3 будет $a_2 = (V_{23} - V_{12})/(t_3 - t) < a_1$. Так как $a_2 < g_s = 274 \text{ м/с}^2$, то

на КВМ продолжали действовать силы помимо гравитационной. В Таблице приведена величина скорости КВМ на $20R_s$, взятая из каталога LASCO. В обоих случаях $V_{20R_s} < V_{23}$, т.е. КВМ тормозились по мере распространения до $20R_s$.

Мы протестировали метод сшивки [7] на наблюдениях [6] и делаем вывод, что он работает. Метод [7] можно применять в отсутствии или при неблагоприятных условиях наблюдений в нижней короне, например, как это было в случае события X5.4 7 марта 2012 (E27). Так как ускорение КВМ не коррелирует с интенсивностью HXR и SXR излучения, а средние скорости КВМ после вспышек X1.3 7 марта 2012 и X2.8 13 мая 2013 практически совпадают ~ 1800 км/с, то сценарии ускорения КВМ, вероятно, были одинаковы. Наибольшая итоговая скорость КВМ X5.4 7 марта 2012 связана с величиной и длительностью ускорения в постепенной фазе. В трех рассмотренных вспышках связанные с ними КВМ ускорялись в двух фазах «импульсной» и «постепенной».

Вспышка X1.3 7 марта 2012 выделяется своими низкими значениями производных температуры $dT(t)/dt$ и меры эмиссии $dEM(t)/dt$, которые примерно на порядок меньше, чем в двух других событиях (рис. 1B-D). Меньший рентгеновский балл второй вспышки X1.3 связан с отсутствием эффектов «хромосферного испарения» (заполнялись только высокие корональные петли, оставшиеся от предыдущей вспышки) – «проточный плазмотрон». Вспышка X5.4 7 марта 2012 началась с фазы нагрева со слабым «хромосферным испарением», больший рентгеновский балл связан с наличием низких петель и выраженного «хромосферного испарения» в них (аналогично во вспышке X2.8 13 марта 2013). Мы согласны с выводом [1], что протоны, генерировавшие длительное γ -излучение >100 МэВ (FermiLAT), непрерывно ускорялись в короне на постэруптивной фазе вспышек.

Литература

1. Ajello M., Albert A., Allafort, A. et al. // ApJ. 2014. V. 789. no 1. id 20.
2. Share G. H., Murphy R. J., White S. M. et al. // Ap J. 2018. V. 869:182 (55pp).
3. Zhang X.L., Gruber D., Kiener J., & von Kienlen A. // Proc. of -9th INTEGRAL Workshop and Celebration of the 10th Anniversary of the Launch. 2012. 139.
4. Struminsky A. and Gan W // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. 632 012081.
5. Zimovets I.V. and Struminsky A.B. // Sol. Phys. 2012. V. 281. No 2. P.749.
6. Gou T., Veronig A.M., Liu R., et al. // ApJ. 2020. V. 897: 136.
7. Струминский А.Б., Григорьева И.Ю., Логачев Ю.И., Садовский А.М. // Геомаг. и аэрономия, 2021, т. 61, №5 (в печати).