ИМПУЛЬСНАЯ ВСПЫШКА C7.2 22 ДЕКАБРЯ 2009 ГОДА В МИНИМУМЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ БЕЗ ХРОМОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ

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, пгт. Научный, Россия

IMPULSE FLARE C7.2 ON DECEMBER 22, 2009 AT THE MINIMUM OF SOLAR ACTIVITY WITHOUT OF CHROMOSPHERIC EFFECTS

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

The impulsive flare C7.2 on December 22, 2009 was considered, in which the maximum of the emission measure (EM_{max}) was ahead of the maximum temperature (T_{max}) of the plasma emitting in the soft X-ray range (GOES data). This does not fit the “standard” solar flare model (CSHKP). Its other distinctive features were the presence of radio emission only at fixed RSTN frequencies below 1415 MHz, as well as radio emission of types II and III. The study showed: 1) there were at least two episodes of energy release in the flare and, accordingly, two maxima T_{max1} and T_{max2} ; 2) the growth of EM to its maximum was caused by the first episode of energy release, T_{max1} ; 3) the flare developed at altitudes above 65 Mm and was accompanied by a coronal mass ejection (CME); 4) CME observed on LASCO_C2 could be accelerated to a speed of 346 km/s between T_{max1} and EM_{max} in 90 s; 5) the second episode of energy release and T_{max2} corresponded to the post-eruptive phase. The results obtained are compared with the characteristics of the M2.9 pulsed flare on July 6, 2012 with radio emission only at RSTN frequencies above 1415 MHz and without CME.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-101-104

Для исследования мы выбрали импульсную вспышку C7.2 22 декабря 2009 года, которая отличается от множества других вспышек C-класса тем, что в ней максимум меры эмиссии (EM_{max}) опережает максимум температуры (T_{max}). Здесь значения T и EM были рассчитаны стандартной процедурой *SolarSoft* по наблюдениям КА GOES мягкого рентгеновского (SXR) излучения в каналах 0.5–4 Å и 1–8 Å. Задержка T_{max} относительно EM_{max} не укладывается в «стандартную» модель (CSHKP) солнечной вспышки (когда «хромосферное испарение» является результатом нагрева хромосферной плазмы), и путает причины со следствиями. Наличие наблюдений не-теплового излучения в жестком рентгеновском (HXR <100 кэВ – RHESSI, Suzaku ~100 кэВ) и радио (245–4995 МГц, RSTN) диапазонах позволяет разобраться в кажущемся противоречии.

Рассмотрим на рисунке 1а временные профили T (серый цвет) и EM (черный цвет) для события C7.2 22 декабря 2009 года с задержкой $T_{\max}$ (толстые линии) и для вспышки M2.9 6 июля 2012 года [1] с задержкой $EM_{\max}$ (тонкие линии). В первом случае (C7.2) хорошо видно два максимума температуры, $EM_{\max}$ опережает $T_{\max 2}$, но запаздывает относительно первого максимума температуры $T_{\max 1}$. Максимумы температуры вспышечной плазмы свидетельствуют о различных эпизодах выделения энергии. Второй случай (M2.9) соответствует «стандартной» модели однопетлевой вспышки с одним энерговыделением.

Рис. 1.

В случае (C7.2 22.12.09) по времени $EM_{\max}$ был между $T_{\max 1}$ и $T_{\max 2}$, т.е. он был результатом первого эпизода нагрева плазмы. Время запаздывания $EM_{\max} = 0.4 \cdot 10^{49} \text{ см}^{-3}$ относительно $T_{\max 1}$ было $\tau \sim 126 \text{ с}$. Плазма нагрелась до $T_{\max 1} \sim 15 \text{ MK}$ при $EM = 0.3 \cdot 10^{49} \text{ см}^{-3}$. Оценка линейного размера источника SXR излучения будет $L = V_T \cdot \tau \approx 65 \text{ Мм}$ при тепловой скорости $V_T = \sqrt{2kT/m_p} \approx 512 \text{ км/с}$, а концентрации плазмы в источнике $n = \sqrt{EM/L^3} = 3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ и тогда плазменная частота $\nu_p = 9000\sqrt{n} = 520 \text{ МГц}$. Второй максимум температуры $T_{\max 2}$ наблюдался на спаде меры эмиссии.

В случае (M2.9 06.07.12) плазма нагрелась до $T_{\max} \sim 20 \text{ MK}$ при $EM = 1.3 \cdot 10^{49} \text{ см}^{-3}$. Оценка линейного размера SXR источника при $V_T \approx 590 \text{ км/с}$ и $\tau \sim 60 \text{ с}$ будет $L = V_T \cdot \tau \approx 35 \text{ Мм}$. Оценка концентрации плазмы в источнике будет $n = \sqrt{EM/L^3} = 1.7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, что соответствует плазменной частоте $\nu_p = 9000\sqrt{n} = 1187 \text{ МГц}$.

На рисунке 1b показаны временные профили HXR излучения в 3-х каналах RHESSI. Из сравнения рисунков 1а и 1b хорошо видно, что максимумы температуры четко коррелируют со всплесками нетеплового HXR излучения (например, канал 25–50 кэВ, RHESSI, рис. 1b). В случае (C7.2 22.12.09) в каналах 25–50 и 50–100 кэВ видно два максимума – два эпизода выделения энергии, а случае (M2.9 06.07.12) один максимум. Временные

профили в канале 12–25 кэВ соответствует уже тепловым процессам, наблюдающиеся характерные времена больше.

Рис. 2.

Полученная выше оценка линейного размера SXR источника и концентрации плазмы в нем (плазменной частоты) для (M2.9 06.07.12) соответствует наблюдениям и идеям [2, 3], что место ускорения электронов (область энерговыведения) в этой вспышке было ограничено по высоте <31 Мм, условиями характерными для плазменной частоты 1415 МГц. Так как не было излучения на низких частотах, то это событие не развилось выше в корону, в нем не было коронального выброса массы (КВМ). Согласно [2] в (M2.9 06.07.12) было недостаточно времени – t (длины $l = at^2/2$) для ускорения КВМ даже с предельной величиной $a = 10 \text{ км/с}^2$.

Напротив вспышка (C7.2 22.12.09) соответствует общепринятым представлениям о месте ускорения электронов и первичного энерговыведения, где концентрация плазмы $n_{acc} = 3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ и плазменная частота $\nu_p \approx 500 \text{ МГц}$ [4, 5]. На рисунке 2а показаны профили радиоизлучения в (C7.2) на частотах 245, 610 и 1495 МГц. Отметим, что согласно [5], частота 1 ГГц является максимальной для преобладания плазменного механизма излучения, 3 ГГц – теплового, а при более высоких частотах преобладает гиротронный механизм. Интенсивность радиоизлучения на частотах 2695 и 4995 МГц составляла не более 20 s.f.u. и не попала в сводные отчеты (SWPC NOAA, /ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/events/). Отсутствие радиоизлучения на частотах > 4995 МГц связано с развитием процессов в условиях малой плотности и слабого магнитного поля. В таких условиях рост EM вызван увеличением объема излучающей плазмы, а не ее концентрации.

Радиоизлучение в (C7.2 22.12.09) на частотах 245–610 МГц началось практически одновременно в 04:53 UT (ноль времени на рисунках в нашей шкале) и далее появлялось последовательно на более низких частотах. Это говорит о распространении вспышечных процессов высоко в корону.

Начиная с 04:57 UT, регистрировалось радиоизлучение II и III типов. Радиоизлучение II типа обычно связывают с ударной волной KBM.

Действительно, в 05:54 UT в поле зрения SOHO/LASCO_C2 на $3.05R_S$ было зарегистрировано первое появление KBM со скоростью 346 км/с (скорость рассчитана по первым двум положениям (1–2) по наблюдениям LASCO). На рисунке 2б показана линейная аппроксимация положения KBM относительно SXR излучения. В предположении, что KBM ускорялся до скорости 346 км/с от $T_{\max 1}$ до $EM_{\max}$, время ускорения будет 90 с, а величина ускорения $a = 3.6 \text{ км/с}^2$. В этом случае второй эпизод энерговыделения соответствует постэруптивной фазе вспышки. При подъеме KBM увеличивался линейный размер SXR источника, поэтому при «хромосферном испарении» роста n и EM не происходило. Второй максимум $T_{\max 2}$ был на фоне спада EM .

Скорость KBM, рассчитанная по точкам (2–3) из наблюдений LASCO, равна 333 км/с. Точки (2,3) находятся вне временного интервала рисунка 2б. Следовательно, замедление KBM происходило при $a \sim 36\text{--}18 \text{ м/с}^2$, что значительно меньше ускорения свободного падения для Солнца ($g = 274 \text{ м/с}^2$). Для такого замедления необходимо, чтобы на KBM действовали силы, выталкивающие его из гравитационного поля Солнца, более полутора часов после начала движения.

Результаты исследования вспышки C7.2 22.12.09 коротко сводятся к следующему:

- 1) во вспышке было по крайней мере два эпизода выделения энергии и, соответственно, два максимума температуры $T_{\max 1}$ и $T_{\max 2}$;
- 2) рост EM до максимума был вызван первым эпизодом энерговыделения, $T_{\max 1}$;
- 3) вспышка развивалась на высотах более 65 Мм и сопровождалась KBM;
- 4) KBM, наблюдаемый на LASCO_C2, мог быть ускорен до скорости 346 км/с между $T_{\max 1}$ и $EM_{\max}$ за 90 с;
- 5) второй эпизод выделения энергии (и $T_{\max 2}$) соответствовал постэруптивной фазе вспышки.

Литература

1. *Altyntsev, A., Meshalkina, N., Myshyakov, I., et al.* // Flare SOL2012-07-06: on the origin of the circular polarization reversal between 17 GHz and 34 GHz // Solar Phys. 2017. V 292. No. 9. PP. 137–152.
2. *Струминский А.Б., Григорьева И.Ю., Логачев Ю.И., Садовский А.М.* // Связь между длительностью и величиной ускорения корональных выбросов массы // Геомаг. и аэрономия. 2021. т. 61. №5 (в печати).
3. *Grigorieva, I., Struminsky, A.* // Flares not following by interplanetary coronal mass ejections and solar proton events // G&A. 2021. т. 61. № 8 (в печати).
4. *Aschwanden M.J.* The localization of particle acceleration sites in solar flares and CMEs // Space Sc. Rev. 2006. V. 124. PP. 361–372.
5. *Aschwanden, M.J.* Physics of the Solar Corona: An Introduction with Problems and Solutions. – Springer. – 2009. P. 924.