

СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВО ВРЕМЯ МОЩНЫХ ВСПЫШЕЧНЫХ СОБЫТИЙ

Гопасюк О.С.

Крымская Астрофизическая Обсерватория РАН, Научный, Республика Крым

STATISTICAL PROPERTIES OF SOFT X-RAY EMISSION DURING LARGE FLARE EVENTS

Gopasyuk O.S.

Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Nauchny, Crimea

We quantify the basic thermodynamic properties of Soft X-Ray (SXR) emission, including plasma temperature and emission measure, obtained by the Geostationary Orbiting Environmental Satellite (GOES) from February 2011 to December 2022 during 59 large flares of GOES class 5.0 and above. The SXR flux maximum depends directly on the energy release, maximum temperature and maximum emission measure. There is no relation between the SXR flux maximum and flare duration determined by the full width at half-maximum of the SXR flux. The magnetic reconnection flux is related strongly to the thermal energy and flare duration. The eruptive flares compared to confined flares have lower the average maximum temperature but higher the average maximum emission measure and the average maximum thermal energy. The duration of eruptive flares is longer. This suggests that large eruptive flares can be developed in longer loops than the compact flares.

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-85-88>

Согласно стандартной модели эруптивной вспышки CSHKP [1–4], заряженные частицы, ускоренные в корональном токовом слое, проникают глубоко в хромосферу и нагревает плотную хромосферную плазму до тех пор, пока она не достигнет максимальной температуры. Во время и после этого процесса горячая хромосферная плазма расширяется и заполняет корональные петли, что приводит к уярчанию вспышечных петель в экстремальном ультрафиолете и мягком рентгене. Как только выделение энергии ослабевает, поток испаренной плазмы также ослабевает, и в какой-то момент плазма начинает конденсироваться обратно в хромосферу, мера эмиссии достигает своего максимального значения. Это явление, известно как «хромосферное испарение».

Поток SXR в диапазонах 1–8 Å и 0.5–4 Å регулярно измеряется GOES. Измерения GOES содержат фундаментальные параметры SXR излучения, такие как максимальный поток в диапазоне 1–8 Å, который традиционно используется для определения класса вспышки, продолжительности вспышки, температуры плазмы, меры эмиссии.

В этой работе мы провели количественную оценку основных термодинамических свойств SXR излучения во время 59 мощных вспышек класса GOES M5.0 и выше, из которых 38 эруптивные (сопровождались коро-

нальным выбросом массы (CME)) и 21 компактная (без CME). Вспышки находились в интервале 40° от центрального меридиана в период с февраля 2011 по декабрь 2022 гг., и были достаточно изолированы во времени от других событий.

По данным GOES с временным разрешением 2 с и 1 с были определены следующие характеристики потока мягкого рентгена: максимальный поток F_{SXR} , максимальная температура плазмы T_{max} , максимальная мера эмиссии EM_{max} , максимальная тепловая энергия $E_{\text{max}_{th}}$, продолжительность вспышки на половине максимума потока FWHM. Также были использованы наши данные о магнитном потоке пересоединения во вспышках и площади вспышечных лент [5].

Тепловая энергия плазмы была определена следующим образом: $E_{th} = 3nk_BTV = 3k_BT\sqrt{EM \cdot A^{3/2}}$, где $n = \sqrt{EM/V}$ – плотность электронов; в качестве объема вспышечной петли V мы используем $V = (A/2)^{3/2}$ (A – площадь вспышечных лент из работы [5]), k_B – постоянная Больцмана, T и EM – температура и мера эмиссии. Если предположить, что V является постоянной величиной, то тепловая энергия E_{th} достигает максимального значения $E_{\text{max}_{th}}$ при максимуме $T\sqrt{EM}$.

Мы проанализировали распределения термодинамических свойств плазмы в эруптивных и компактных вспышках (рис. 1).

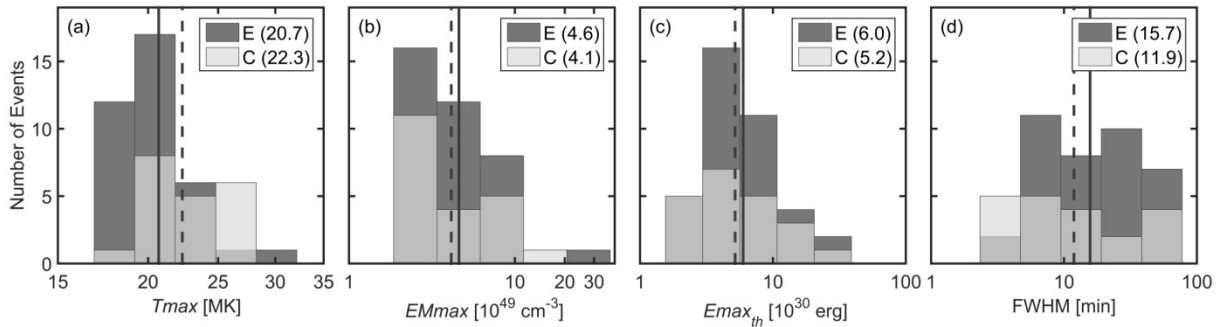


Рис. 1. Распределения (а) максимальной температуры плазмы, (б) максимальной меры эмиссии, (с) максимальной тепловой энергии, (д) продолжительности вспышки FWHM в эруптивных (темные) и компактных (светлые) вспышках. Вертикальные прямые обозначают среднелогарифмические значения параметров для эруптивных (сплошные) и компактных (штриховые) событий. На вставке указаны среднелогарифмические значения параметров для эруптивных и компактных событий.

Распределения показывают, что в эруптивных вспышках, по сравнению с компактными, средняя максимальная температура ниже, а максимальная мера эмиссии и максимальная тепловая энергия выше, больше и продолжительность вспышки.

Связь максимального потока мягкого рентгена с максимальной температурой, мерой эмиссии и тепловой энергией представлена на рис. 2. Максимальный поток мягкого рентгеновского излучения GOES напрямую связан с основными термодинамическими свойствами плазмы.

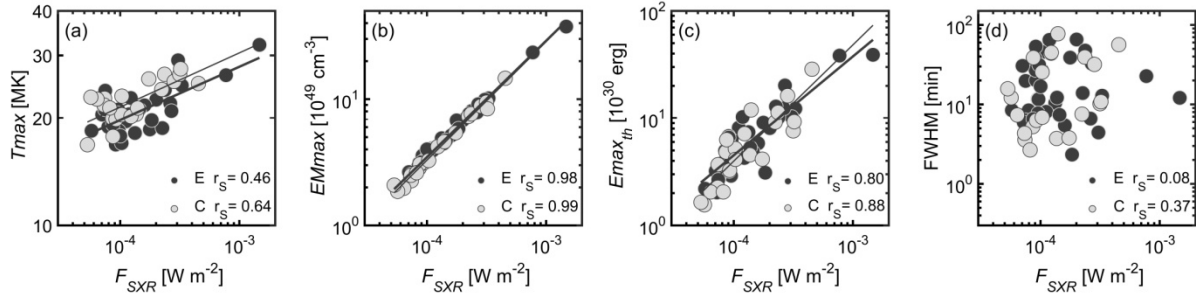


Рис. 2. Зависимости (а) максимальной температуры, (б) максимальной меры эмиссии, (с) максимальной тепловой энергии, (д) продолжительности вспышки FWHM в эруптивных (темные символы) и компактных (светлые символы) вспышках от максимального потока мягкого рентгена. Толстые и тонкие прямые представляют линейную регрессию в log-log шкале для эруптивных и компактных событий соответственно. На вставке показан коэффициент корреляции Спирмена r_s между каждой парой нанесенных на график переменных для эруптивных и компактных вспышек.

Наблюдаются линейные зависимости с коэффициентами корреляции Спирмена от умеренного с максимальной температурой, до высокого с максимальной мерой эмиссии и максимальной тепловой энергией. Эти корреляции согласуются, например, с результатами [6, 7] и стандартной моделью хромосферного испарения [3], где максимальный поток рентгеновского излучения зависит от максимальной меры эмиссии. Между продолжительностью вспышки и максимальным потоком мягкого рентгена корреляция практически отсутствует. Не все крупные вспышки имеют большую продолжительность. Нет никакого отличительного поведения между вспышками с СМЕ и без.

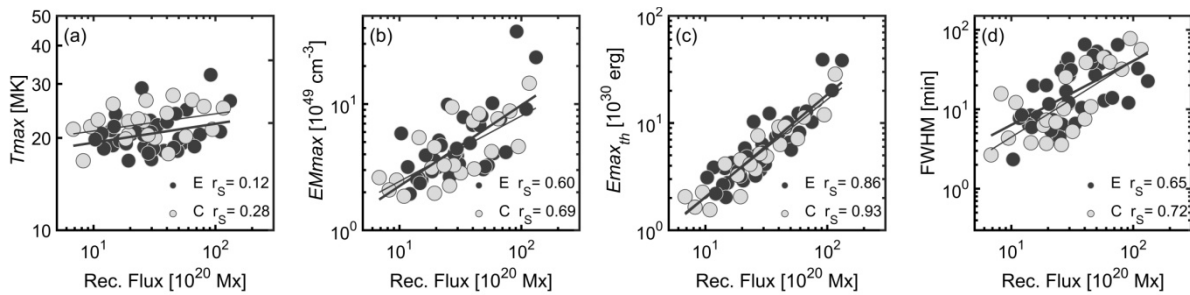


Рис. 3. Зависимости (а) максимальной температуры, (б) максимальной меры эмиссии, (с) максимальной тепловой энергии, (д) продолжительности вспышки FWHM в эруптивных (темные символы) и компактных (светлые символы) вспышках от потока магнитного пересоединения. Толстые и тонкие прямые представляют линейную регрессию в log-log шкале для эруптивных и компактных событий соответственно. На вставке показан коэффициент корреляции Спирмена r_s между каждой парой нанесенных на график переменных для эруптивных и компактных вспышек.

Между термодинамическими характеристиками плазмы и потоком магнитного пересоединения также имеются линейные зависимости (рис. 3). Однако коэффициенты корреляции Спирмена между магнитным

потоком пересоединения и максимальной температурой и максимальной мерой эмиссией существенно более низкие, а с максимальной тепловой энергией наоборот, коэффициент корреляции выше. Поток магнитного пересоединения имеет сильную корреляцию с продолжительностью вспышки. Связь между продолжительностью вспышки и потоком магнитного пересоединения показывает, что чем больше магнитного потока вовлечено в пересоединение, тем дольше продолжаются процессы пересоединения.

Обнаруженные нами различия в усредненных физических параметрах для эруптивных и компактных событий позволяют предположить, что высокотемпературная плазма в мощных эруптивных событиях, по сравнению с компактными событиями, развивается в более длинных магнитных петлях. На этот вывод указывают несколько предыдущих исследований. Например, как было получено в работе [8], вспышки с большей продолжительностью обычно холоднее и развиваются в больших объемах. В работе [9] было показано, что события с более длительными продолжительностью FWHM и временем затухания должны иметь большее разделение вспышечных лент, т. е. развиваться в более длинных петлях.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания № 122022400225-4.

Литература

1. *Carmichael, H.* // NASSP, 1964, vol. 50, p. 451.
2. *Sturrock, P.A.* // Nature, 1966, vol. 211, p. 695.
3. *Hirayama, T.* // Solar Phys., 1974, vol. 34, p. 323
4. *Kopp, R.A., Pneuman, G.W.* // Solar Phys., 1976, vol. 50, p. 85.
5. *Gopasyuk O.S.* // Geomagnetism and Aeronomy, 2024, vol. 64, issue 8 (in press).
6. *Feldman, U., Doschek, G.A., Behring, W.E., Phillips, K.J.H.* // Astrophys. J., 1996, vol. 460, p. 1034.
7. *Kazachenko, M.D.* // Astrophys. J., 2023, vol. 958, id. 104.
8. *Bowen, T.A., Testa, P., Reeves, K.K.* // Astrophys. J., 2013, vol. 770, id. 126.
9. *Reep, J.W., Toriumi, S.* // Astrophys. J., 2017, vol. 851, id. 4.