

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ И ВСПЫШЕЧНЫХ ЛЕНТ, СВЯЗАННЫХ С МОЩНЫМИ ВСПЫШКАМИ

Гопасюк О.С.

Крымская Астрофизическая Обсерватория РАН, Научный, Республика Крым, Россия

STATISTICAL CHARACTERISTICS OF ACTIVE REGIONS AND FLARE RIBBONS ASSOCIATED WITH LARGE FLARES

Gopasyuk O.S.

Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Nauchny, Crimea, Russia

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-63-66>

We conducted the statistical study of the characteristics of active regions (AR) and ribbons associated with flares of GOES class M5.0 and larger that occurred within 40° from the center meridian between February 2011 and December 2022. These criteria lead to a total of 60 flares, for which we analyze the observational data obtained by the Solar Dynamics Observatory. The magnetic flux reconnection in the flare correlates with the flare GOES 1-8 Å SXR peak flux for both compact and eruptive flares. For the same GOES class flares the mean magnetic flux density in ribbon is higher for confined than for eruptive events. It was found that AR with confined flares demonstrate areas and the unsigned magnetic flux approximately twice as large as the areas and magnetic flux of AR with eruptive flares. At the same time, the fraction of the AR flux involved in reconnection is greater in eruptive flares. The reconnection rate showed a temporal evolution similar to the observed HXR emission.

Солнечные вспышки часто происходят в сочетании с корональными выбросами массы (СМЕ). Считается, что оба явления тесно связаны и являются различными проявлениями одних и тех же физических процессов лежащих в их основе (например, [1]). Вспышки, связанные с СМЕ, обычно называют эруптивными событиями, в то время как вспышки, при которых отсутствуют сопутствующие выбросы корональной плазмы, называются компактными событиями или событиями "без СМЕ" [2]. Солнечные вспышки обладают большим разнообразием морфологических и эволюционных характеристик. Они преимущественно возникают из-за сложных конфигураций магнитного поля и могут свидетельствовать о сложном движении вспышечных лент. Исследования (см., например, [3]), предполагают тенденцию возникновения эруптивных вспышек на больших расстояниях от центров АО. Анализ вспышек класса X [4] показал, что нет очевидной разницы в продолжительности вспышек между эруптивными и неэруптивными событиями, и что неэруптивные события, как правило, имеют большую площадь пятна.

В этой работе мы исследовали различные характеристики активных областей (АО) и вспышечных лент, связанных с двумя типами вспышек:

эруптивными и компактными. Нами были отобраны вспышки *GOES* класса M5 и выше, произошедшие с февраля 2011 г. по декабрь 2022 г. и находившиеся в интервале $\pm 40^\circ$ от центрального меридиана. Этим критериям соответствовало 60 вспышек, из которых 39 были эруптивными, а 21 компактными.

Для определения местоположения и формы вспышечных лент были использованы данные *SDO/AIA* в полосе 1600 Å. Магнитные характеристики вспышечных лент и АО были определены на основании предвспышечных магнитограмм B_n нормальной составляющей поля, полученных на основании данных полного вектора *SDO/HMI*. Для определения местоположения и формы АО использованы маски HARP BitMap.

Благодаря магнитной связи между хромосферными вспышечными лентами и областью коронального пересоединения можно оценить скорость магнитного пересоединения следующим образом (например, [5]):

$$\dot{\phi} = \frac{\partial}{\partial t} \int B_c dA_c = \frac{\partial}{\partial t} \int B_n dA_r,$$

где B_c и dA_c – магнитное поле и площадь пересоединения в короне; B_n – нормальная составляющая фотосферного магнитного поля в области хромосферных вспышечных лент, являющихся основаниями пересоединенных в короне силовых линий магнитного поля; dA_r – площадь вспышечных лент. Суммирование полного нормального потока, охватывающего область вспышечных лент: $\phi_r = \int \dot{\phi} dt = \int B_n dA_r$, дает косвенную, но четко определенную меру количества магнитного потока, пересоединенного в короне во время вспышки.

Таким образом были определены поток магнитного пересоединения во вспышке и скорость его изменения, площадь вспышечных лент и средняя плотность магнитного потока в ленте. Поток магнитного пересоединения (рис. 1a) и площадь лент (рис. 1b) хорошо коррелируют с максимальным значением потока *GOES* SXR (1–8 Å) как для компактных, так и для эруптивных вспышек. Для одного класса *GOES* в компактных вспышках, по сравнению с эруптивными, средняя плотность магнитного потока в лентах выше примерно в два раза (рис. 1c). На вставке указаны коэффициенты корреляции. Прямые обозначают линейную регрессию в log-log шкале для эруптивных (толстая) и компактных (тонкая) вспышек.

Полученная скорость магнитного пересоединения (рис. 2) демонстрирует временную эволюцию аналогичную наблюдаемому HXR излучению – максимумы скорости пересоединения соответствуют пикам в наблюдаемом нетепловом излучении (производной SXR излучения *GOES*) как по величине (рис. 2a), так и по времени возникновения (рис. 2b). В качестве ноль-времени выбрано время начала вспышки по данным *GOES*. На вставке указаны коэффициенты корреляции и наклоны регрессионных прямых (для рис. 2a в log-log шкале) для эруптивных (толстая) и компактных (тонкая) вспышек.

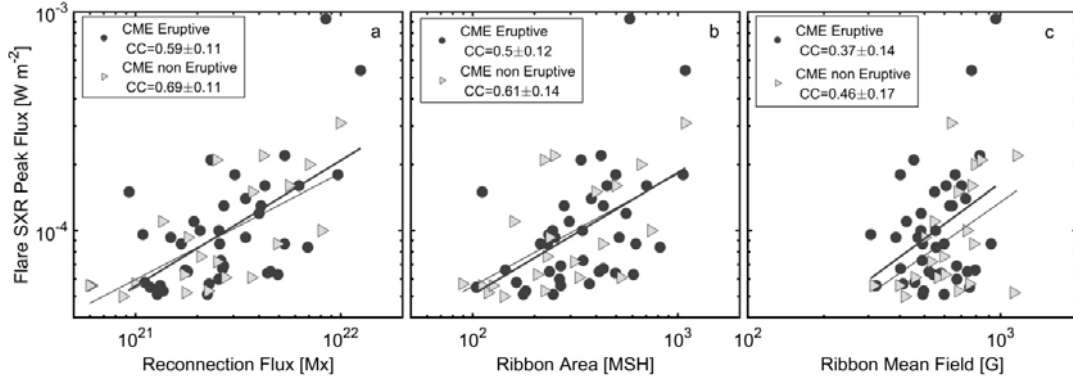


Рис. 1.

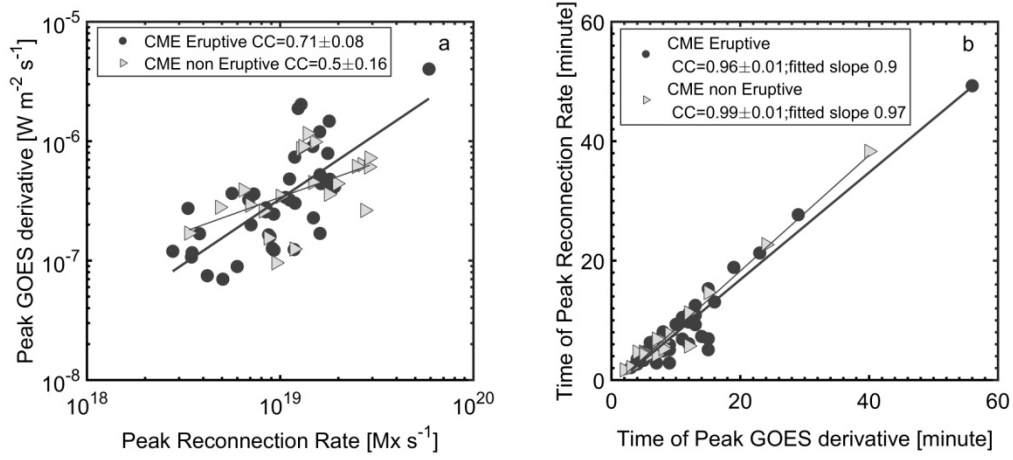


Рис. 2.

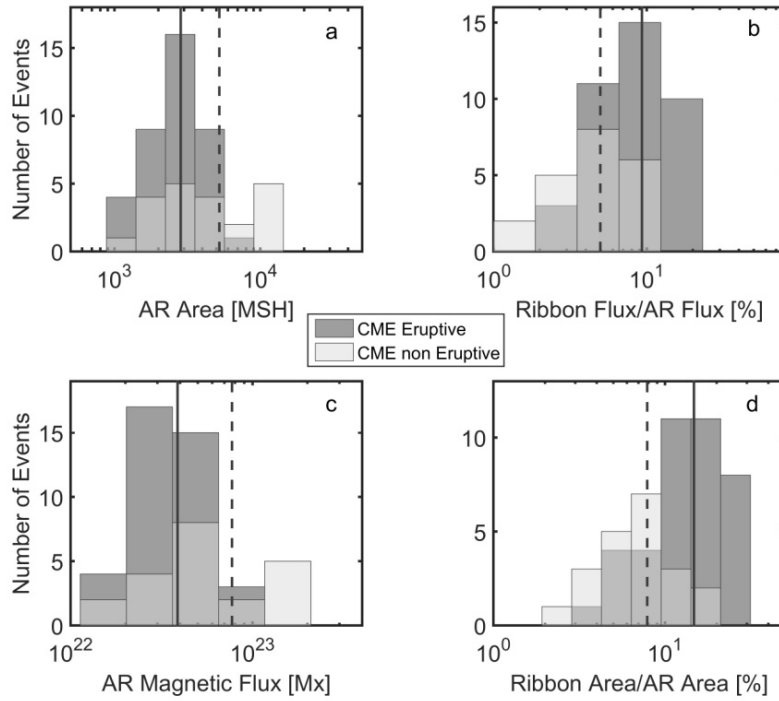


Рис. 3.

Статистически мы получили, что площади и беззнаковый магнитный поток АО с компактными вспышками примерно в два раза превышают площади и магнитный поток АО с эруптивными вспышками (рис. 3ac). В тоже время, доля потока и площади АО, участвующая в пересоединении, больше во вспышках с CME (Рис. 3bd). Вертикальные линии обозначают средние значения в log шкале для эруптивных (сплошные) и компактных (пунктирные) событий.

Мы определили расстояния между центрами противоположных полярностей АО, а также между центром АО и центром вспышки. Эруптивные вспышки происходят преимущественно в АО с компактной конфигурацией полей. Компактные вспышки возникают в АО с более протяженной биполярной конфигурацией полей (рис. 4a).

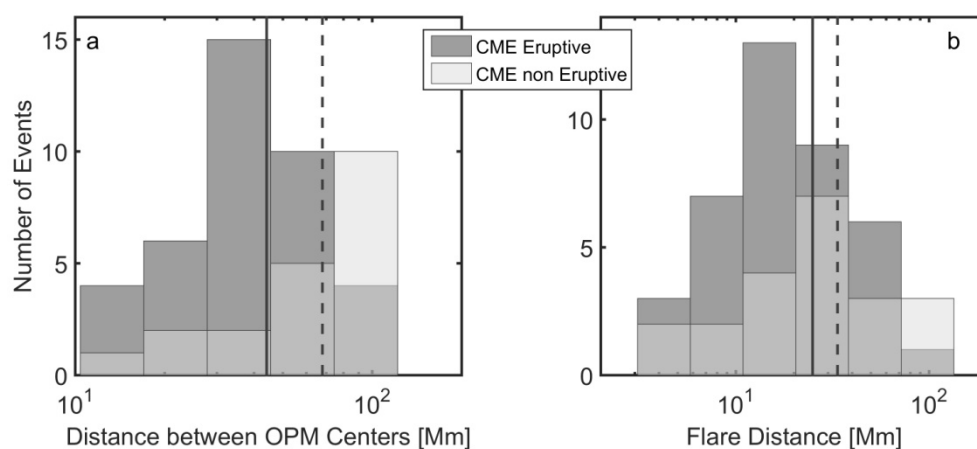


Рис. 4.

Вспышки, как эруптивные, так и компактные происходят на различных расстояниях от центра АО (рис. 4b). Однако можно заметить некоторую тенденцию, что эруптивные вспышки, по сравнению с компактными, возникают ближе к центру АО. Вертикальные линии обозначают средние значения в log шкале для эруптивных (сплошные) и компактных (пунктирные) событий.

Литература

1. Priest, E.R., Forbes, T.G. // *Astronomy Astrophys. Review*, 2002, vol. 10, № 4, p. 313.
2. Svestka, Z. // in *Proc. Solar Maximum Mission Symp., The Lower Atmosphere of Solar Flares*, ed. D.F. Neidig (Sunspot, NM: National Solar Observatory), 1986, p. 332.
3. Wang, Y., Zhang, J. // *Astrophys. J.*, 2007, vol. 665, p. 1428.
4. Harra L., Schrijver, C.J., Janvier, M., et al. // *Solar Phys.*, 2016, vol. 291, p. 1761.
5. Forbes T.G., Priest E.R. // *Solar Phys.*, 1984, vol. 94, № 2, p. 315.