LDE-ВСПЫШКИ И СВЯЗАННЫЕ С НИМИ ХРОМОСФЕРНЫЕ И КОРОНАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В 24-м СОЛНЕЧНОМ ЦИКЛЕ

Шаховская А.Н.¹, Григорьева И.Ю.²

¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Республика Крым, Научный, Россия

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

LDE-FLARES AND RELATED CHROMOSPHERIC AND CORONAL PHENOMENA IN THE 24TH SOLAR CYCLE

Shakhovskaya A.N.¹, Grigoryeva I.Yu.²

¹Crimean Astrophysical Observatory RAS, Nauchny, Republic of Crimea, Russia

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

The causes leading to long duration events in soft x-rays are investigated. There is a hypothesis that settling after matter after CME promotes the formation of a post-eruptive arcade and prolonged emission of plasma in soft X-rays. However, previous studies show a low correlation between the mass of the CME and the duration of x-ray bursts. We investigated LDE-flares of the 24-th cycle and in the course of statistical analysis found that a significant part of them is associated with CMEs of small masses, and some are not accompanied by CMEs at all. The diagrams of the mass and power of LDE-flares in dependence on their duration are constructed, from which it can be seen that there is a SXR-power limit in LDE-events, i.e. the full energy of soft x-ray radiation. Apparently, this indicates the existence of maximal flare energy limit that can be realized in a particular solar cycle. This last fact should be investigated in detail on the material of other solar cycles.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-455-458

Солнечные вспышки, регистрируемые в мягком рентгеновском диапазоне (SXR, GOES данные) длительностью более 40 минут (the *Long Duration Event*: LDE-события [1]), связаны с формированием крупномасштабных постэруптивных аркад (петельных систем), видимых в ультрафиолете над активными областями. Общеизвестно, что для этого необходим дополнительный подвод энергии помимо выделения энергии в импульсной фазе. Одним из таких источников энергии может быть поступление ее от оседающего вещества после коронального выброса массы (КВМ, [2]). Авторы работы [3] даже нашли незначительную корреляцию (0,45) между массой КВМ и длительностью SXR-вспышек. Однако встречаются LDE-вспышки и без массивных КВМ, и вопрос о дополнительной энергии остается открытым.

В нашей работе мы сделали статистический анализ всех LDE-вспышек 24 цикла солнечной активности, которые были обнаружены по сводным отчетам о солнечной активности американского центра предсказаний космической погоды *the Space Weather Prediction Center* – SWPC, ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/events/. Отбирались вспышки с общей SXR-

длительностью > 40 минут и SXR-баллом от M1.0 и выше, сопровождавшиеся KBM, их оказалось 72 штуки с 2011-го по 2017-й год. Масса KBM взята из каталога SOHO LASCO CME CATALOG (cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/ [4]), также использованы данные космических миссий SOHO/EIT, SDO/AIA, STEREO EUVI и H-альфа (Kanzelhoehe Observatory), взятые из открытого доступа.

Наша выборка LDE-вспышек может быть охарактеризована следующими статистическими особенностями:

- Общее число включенных событий 72.
- Масса KBM определена для 64 (89%) из них.
- Рекуррентные вспышки составили 24 (33%).
- Канныализм KBM отмечен у 12 (17%).
- Несколько максимумов в SXR-излучении (GOES) у 21 (29%).
- EUV-джеты и миниэрупции зарегистрированы в 22 (31%).
- Оседающие эрупции, видимые на лимбе в $304\text{\AA}$ 6 (8%).

Рис. 1. Диаграмма распределения массы KBM в событиях 24 цикла (ромбы) и 23 цикла (кружки) в зависимости от длительности связанных с ними LDE-вспышек.

Диаграммы зависимости массы KBM и потока SXR-излучения (GOES) от длительности ($Duration$) связанных с ними LDE-вспышек приведены на рисунках 1 и 2, соответственно. Для сравнения в диаграммы мы включили 4 мощные вспышки 23 цикла, отмечены кружками с датой на рисунках. На рис. 1 указаны только 2, так как не было наблюдений KBM.

На рис. 1 сразу обращает внимание на себя то, что в выбранных нами 64 LDE-событиях KBM есть ограничение по массе $< \sim 5 \cdot 10^{16}$ грамм. Иными словами массивнее не смог оказаться ни один KBM, даже с длительно-

стью $> \sim 30 \cdot 10^3$ сек. Это в принципе согласуется с общепринятой гипотезой, что в условиях атмосферы Солнца вспышки ограничены по энергии $< 10^{34}$ эрг [5] в случае предположения, что КВМ – это один из способов расхода магнитной энергии, запасенной перед вспышкой. Также на диаграмме (рис. 1) видно, что значения массы могут варьироваться в пределах 5 порядков при одинаковой длительности. Таким образом, корреляции между массой КВМ и длительностью вспышки отсутствует.

Рис. 2. Диаграмма распределения потока SXR-излучения в канале 1–8Å GOES от длительности LDE-вспышек. Ромбы – события 24 цикла, кружки – события 23 цикла с указанием конкретных дат цифрами. Линия – порог для событий 24 цикла.

На рис. 2 приведена диаграмма зависимости длительности LDE-вспышек от потока SXR-излучения в канале 1–8 Å GOES. Из нее хорошо видно, что выбранные вспышки 24 цикла были ограничены по мощности, что показывает прямая линия, проведенная на рис. 2. Так как данные на этом рисунке приведены в двойном логарифмическом масштабе, то максимальный SXR-поток F является степенной функцией от длительности t , т.е. $F = At^{-\alpha}$. Если максимальная интенсивность SXR-излучения соответствует минимальной длительности вспышки, то полная энергия SXR-всплеска должна быть ограничена. Отметим, что есть физические ограничения на минимальную длительность SXR-всплеска, например, время заполнения петли хромосферной плазмой, $t_{min} = \frac{L}{V} = 100$ с, где $L = 10000$ км – размер петли, $V = 100$ км/с – характерная скорость плазмы. Отсюда можно оценить количество петель нужное для реализации LDE-события.

Любопытно, что некоторые события 23 цикла находятся выше ограничивающей прямой на рис. 2. Это, возможно, указывает на существование максимальной энергии вспышки, которая может быть реализована в

конкретном солнечном цикле. Есть идеи о связи максимальной энергии вспышек с характеристиками магнитного динамо [Д.Д. Соколов и др., частное сообщение ИКИ, 2018].

Таким образом, исследовав LDE-события 24 цикла, мы не нашли корреляции между массой KBM и длительностью вспышек. Это не согласуется с предположениями в работах [2, 3], что длительность SXR-излучения является результатом оседанием вещества KBM. Но не исключено влияние миниэрупций в H-альфа и EUV-джетов. По нашему мнению длительный мягкий рентген во вспышках – следствие ускорения и хромосферного испарения в отдельных постэруптивных петлях. Проанализировав мощность и длительность выбранных SXR LDE-вспышек, мы нашли, что явной корреляции между этими величинами тоже нет, но можно ввести ограничение на максимальную мощность в зависимости от длительности. Последний факт должен быть детально исследован на материале других солнечных циклов.

Авторы благодарят Л.А. Пустильника и А.Б. Струминского за полезную дискуссию во время конференции ССЗФ-2019 (ГАО РАН); коллективы спутниковых инструментов SOHO/LASCO, SDO_AIA/HMI, GOES, STEREO-B и команду наземной сети радиоданных RSTN за открытую политику данных.

Работа, выполненная Шаховской А.Н. (КрАО РАН), осуществлена за счет субсидии программы «Общие и локальные характеристики Солнца»; Григорьевой И.Ю. (ГАО РАН) – за счет субсидии программы «Энерговыведение» и частично поддержана Программой Президиума РАН.

Литература

1. *Antalova, A., Ogir, M.B.* // Astronomical Institutes of Czechoslovakia, Bulletin, 1988, vol. 39, no. 2, Jan., p. 97-105.
2. *Shibasaki, K.* // Astrophysical J., 2002, Vol. 567(1), pp. L85-L87.
3. *Yashiro S., Gopalswamy N.*, Statistical relationship between solar flares and coronal mass ejections // Proc., IAU Symp., Vol. 257, p. 233-243.
4. *Yashiro S., Gopalswamy N., Michalek G., et al.* // J. Geophys. Res., 2004, V. 109, P. A07105.
5. *Katsova M.M., Livshits M.A.* The Origin of Superflares on G-Type Dwarf Stars of Various Ages // Sol. Phys., 2015, 290(12), pp. 3663-3682.