СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК В МЯГКОМ РЕНТГЕНОВСКОМ ИЗЛУЧЕНИИ В 23–24 ЦИКЛАХ

Шаховская А.Н.¹, Григорьева И.Ю.²

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

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

STATISTIC STUDY OF SOLAR FLARES IN SOFT X-RAY EMISSION 23–24 CYCLES

Shakhovskaya A.N.¹, Grigoryeva I.Yu.²

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

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

Statistic study of SXR flares of the 23rd and 24th cycle using data of GOES satellites was carried out. Following flare parameters were considered as magnitude, duration, emission measure, temperature and delay of the peak emission measure relative to the peak temperature. Scattering diagrams of these values relative duration of flares were constructed and their possible physical meaning were discussed. Negative and positive extreme values of the delay in some flares is unexpected result and these flares deserve a special study.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-353-356

В предыдущих работах авторы исследовали зависимость максимального потока мягкого рентгеновского (SXR) излучения от длительности вспышек [1]. Проанализировав максимальную мощность и длительность выбранных SXR LDE-вспышек, мы нашли, что явной корреляции между этими величинами нет, но можно ввести ограничение на максимальную мощность в зависимости от длительности. В настоящей работе мы проверили наш результат на более обширном материале, включая вспышки любой длительности и исследуя характеристики SXR излучения, такие как температура (Т) и мера эмиссии (ЕМ) вспышечной плазмы. Для нашего исследования мы выбрали SXR вспышки, наблюдавшиеся спутниками GOES с 2002 по 2019 год балла C5 и выше. В открытой базе данных <https://github.com/vsadykov/TEBBS> [2] таких событий оказалось 5258 за этот период, для них указаны следующие величины: длительность, ЕМ, Т и задержка максимума ЕМ относительно максимума Т, пример алгоритма вычислений описан в работе [3]. Мы использовали максимальные значения потока, ЕМ и Т. Интенсивность SXR излучения, зарегистрированного GOES является произведением функции от Т на ЕМ, считая что вся вспышечная плазма находится при температуре Т (одно-температурное приближение). Для исследования более тонких эффектов необходимо учитывать дифференциальную ЕМ. Это является основанием для отдельного исследования эффектов, зависящих от Т и ЕМ.

Рис. 1. Диаграмма рассеяния максимальной мощности потока SXR излучения (Ватт/м²) во вспышках по данным GOES (канал 1–8Å) в 2002–2017 гг. *Вверху*: относительно максимальной EM($10^{49}/\text{см}^3$), *внизу* – максимальной T(MK). Пунктирные линии серого цвета – корреляционные зависимости.

На рисунке 1 приведены диаграммы рассеяния максимумов потока SXR излучения относительно EM (вверху) и T (внизу) вспышек. Наилучшая корреляция наблюдается между потоком и EM, коэффициент корреляции 0.99. Максимальна T вспышки коррелирует с логарифмом от максимального потока мощности с коэффициентом 0.5.

Рис. 2. Диаграмма рассеяния длительности вспышек (секунды): *верхняя панель* – относительно максимальной T(MK), *нижняя* – максимальной EM($10^{49}/\text{см}^3$).

Как видно на верхней панели рисунка 2 в T можно предположить наличие некоторого максимального значения, зависящего от длительности

вспышки. Чем короче вспышка, тем больше максимальная T , и наоборот. Вероятно, это связано с тем, что видим мы эффект влияния одной сильно нагретой петли, то есть в пределе мы должны видеть одну нагретую петлю, и тогда длительность вспышки будет определяться только условиями теплопроводности и излучения (потерями энергии). При больших длительностях виден интегральный эффект от большого количества петель.

Рис. 3. Диаграмма зависимости задержки максимума ЕМ от максимума T , относительно длительности вспышки. Оси: X – длительность SXR потока и Y – задержка в секундах.

На рисунке 3 приведена диаграмма рассеяния длительности вспышек относительно задержки максимума ЕМ от максимума T . Известно, что в стандартной модели вспышки (CSHKP) сначала происходит нагрев (рост T), в результате которого меняется концентрация плазмы (рост ЕМ, — происходит хромосферное испарение). Другим процессом в результате которого может меняться ЕМ — это вовлечение большого количества петель (увеличения объема вспышечной области, например, подъем жгута или развитие коронального выброса массы [4]). Из диаграммы следует, что для большинства событий эта задержка положительная, но обнаружены и отрицательные величины. По абсолютной величине и те и другие не превосходят длительность самих вспышек, а некоторые очень близки к ней. Те

события, которые показали отрицательную задержку требуют индивидуального рассмотрения, так как они не укладываются в стандартную модель вспышки. События со слишком большой задержкой тоже требуют дополнительного анализа ввиду их малой вероятности.

По результатам нашего исследования можно сделать следующие выводы:

- 1) Интенсивность SXR излучения зависит в большей степени от максимальной EM, чем от максимальной T вспышки.
- 2) T в большинстве событий меняется быстрее EM.
- 3) По-видимому, на длительность SXR вспышек накладывается некоторое ограничение по мощности.
- 4) Задержка максимума EM от максимума T, всегда меньше длительности вспышки, но в некоторых случаях может быть близка к ней.

Причина низкой корреляции максимальной T и максимального потока мощности SXR излучения, по нашему мнению заключается в том, что в некоторый момент времени реально греется одна или малое количество петель. Та температура, которую мы смотрим – это средняя T по всем петлям. Чем больше объем (количество петель), тем хуже корреляция. Большая задержка максимума EM относительно максимума T, близкая к длительности самой вспышки в SXR излучении говорит о том, что длительность вспышки определяется как раз EM (увеличением объема, ростом количества петель). В дальнейшем исследовании предполагается детально рассмотреть события с отрицательной задержкой и внести поправки во времена задержек.

Авторы благодарят коллективы спутниковых инструментов GOES, 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 «Энерговыделение».

Литература

1. Шаховская А.Н., Григорьева И.Ю. Роль хромосферных и корональных выбросов в развитии солнечных LDE-вспышек в 24 цикле // Сборник Трудов XXIII всероссийской ежегодной конференции по физике 2019. с. 455. DOI: 10.31725/0552-5829-2019-455-458
2. Sadykov, V.M.; Kosovichev, A.G.; Kitiashvili, I.N.; Frolov, A. Statistical Properties of Soft X-Ray Emission of Solar Flares // *ApJ*, V. 874(1), article id. 19, 11 pp. (2019). DOI: 10.3847/1538-4357/ab06c3.
3. Ryan, D.F., Milligan, R.O., Gallagher, P.T., et al. The Thermal Properties of Solar Flares over Three Solar Cycles Using GOES X-Ray Observations // *ApJ Sup. Series*, 2012, 202, 11. DOI:10.1088/0067-0049/202/2/11.
4. Zimovets I., Struminsky A. Non-thermal "Burst-on-Tail" of Long-Duration Solar Event on 26 October 2003 // *Sol. Phys.*, V 281(2), pp.749-763.