

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ ВО ВРЕМЯ ВСПЫШКИ КЛАССА М ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ЯРКОСТИ ВСПЫШЕЧНЫХ ЛЕНТ

Ерофеев Д.В., Кузьменко И.В.

*Институт прикладной астрономии Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия*

SPATIO-TEMPORAL VARIATIONS OF ENERGY RELEASE IN M-CLASS FLARE FROM MEASUREMENTS OF FLARE RIBBONS BRIGHTNESS

Erofeev D.V., Kuzmenko I.V.

Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

We measured spatio-temporal distributions of UV brightness in flare ribbons observed in the course of M-class solar flare of 29.01.2024. Analysis shows presence of large-scale (≈ 20 arc sec), wave-like structures which move along the ribbons in different directions, and short-term variations of brightness which manifest themselves in form of quasi-periodic pulsations both in integral brightness of the ribbons and in hard X-ray emission.

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-103-106>

Солнечная вспышка представляет собой комплекс различных физических явлений в плазме, объединенных в один взаимосвязанный процесс накопления и выделения энергии. Для того чтобы понять связь между различными физическими процессами, необходимо проводить комплексное мультиспектральное исследование отдельных вспышечных событий.

В настоящей работе мы исследуем энерговыделение во вспышке класса М6.8 с началом в 03:54 UT, которая произошла 29.01.2024 г. в активной области NOAA 13559 с координатами N28°, W86°. Вспышка сопровождалась всплесками жесткого рентгеновского (ЖР) и см радиоизлучения, причем в интегральных потоках ЖР и радиоизлучений, а также УФ-излучении вспышечных лент наблюдались квазипериодические пульсации (КПП) минутного диапазона [1].

В качестве меры энерговыделения нами определено пространственно-временное распределение яркости вспышечных лент по изображениям SDO/AIA в канале 1600 Å (рис. 1, слева). Для каждой из лент вводилась координатная система (X,Y), ось Y которой направлена вдоль среднего положения ленты с юга на север. Затем для каждого Y находилось положение и значение максимальной яркости в пределах достаточно широкого интервала X. Таким образом, для каждой из лент получена 2-мерная зависимость яркости $B(Y,t)$. На рис. 1, справа, показано сравнение интегральной яркости лент (красная кривая) и ЖР излучения в полосе 20–50 кэВ по данным ASO-S (зеленая кривая), которое показывает существенную корреляцию этих параметров, в частности корреляцию их КПП минутного диапазона.

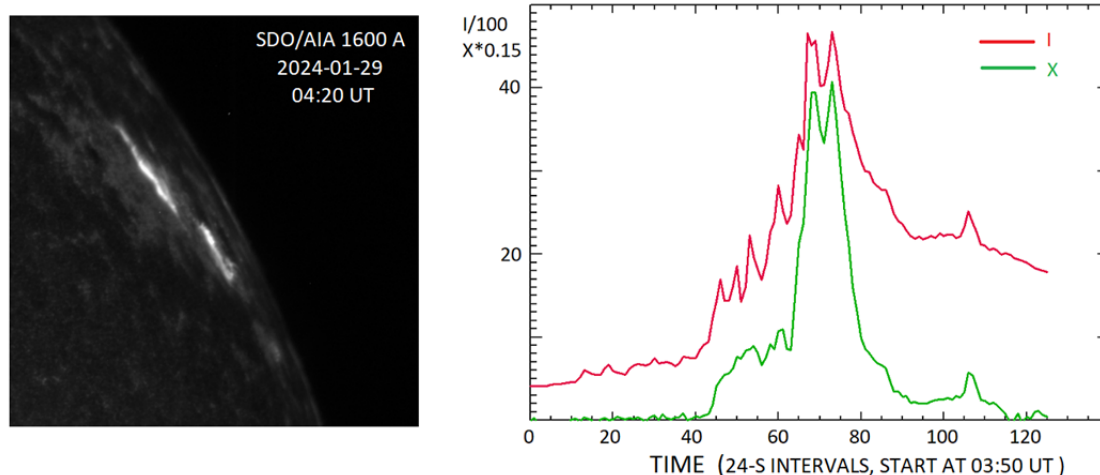


Рис. 1.

На рис. 2 показаны пространственно-временные зависимости яркости западной (W) и восточной (E) вспышечных лент по измерениям в канале 1600 Å (вертикальные оси – координаты вдоль лент, Y_W и Y_E , по горизонтальным осям – всемирное время). Как можно видеть, в крупных пространственном и временном масштабах эти зависимости демонстрируют значительные различия.

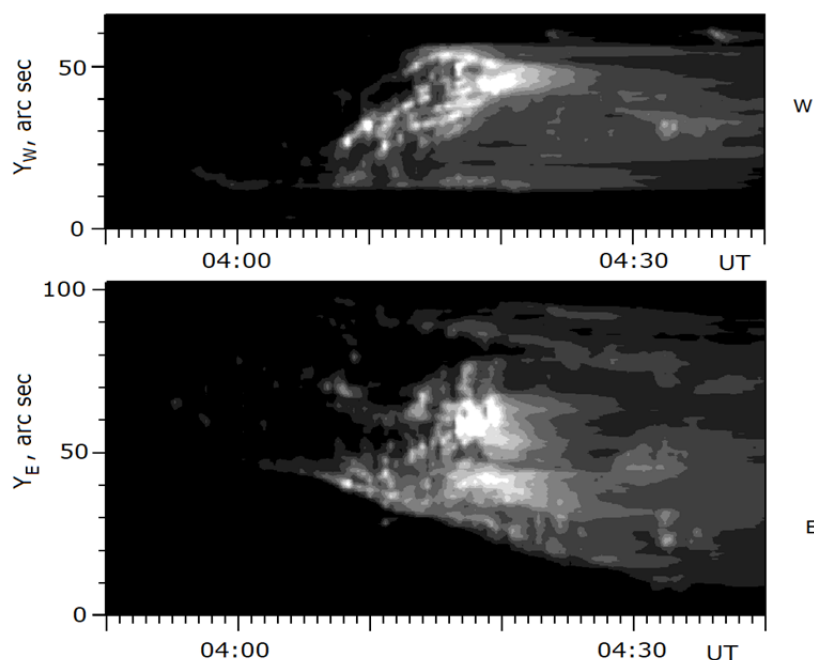


Рис. 2.

В W-ленте выделяется область высокой яркости размером $\approx 20''$, которая перемещается вдоль ленты с юга на север, причем внутри этой области имеется более мелкомасштабная структура. В E-ленте можно выделить 4 области приблизительно того же масштаба, две яркие и две более узкие и

слабые, которые перемещаются в обратном направлении, т.е. с севера на юг, и с меньшей скоростью. Перемещение максимумов яркости вдоль лент можно объяснить распространением возмущений вдоль токового слоя (рис. 3, слева), либо скрученной структурой магнитного поля (рис. 3, справа).

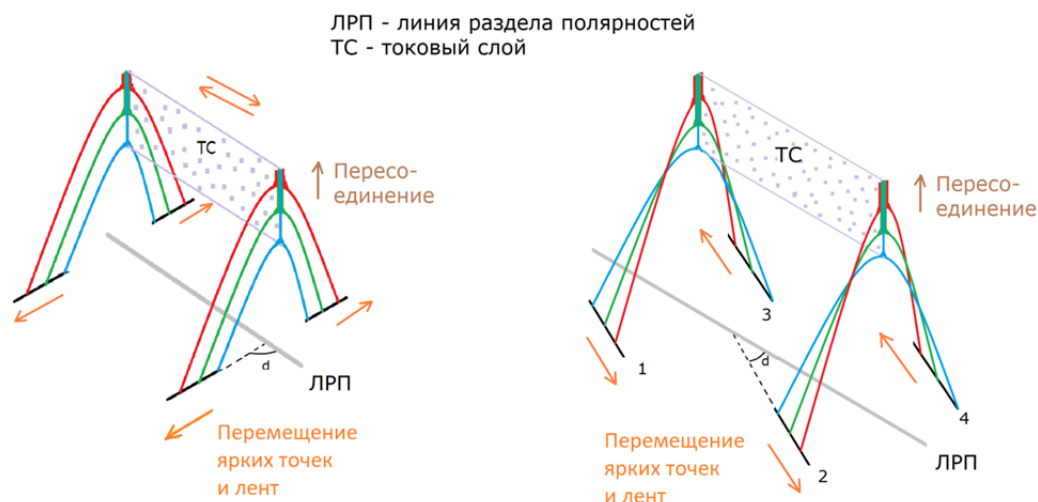


Рис. 3.

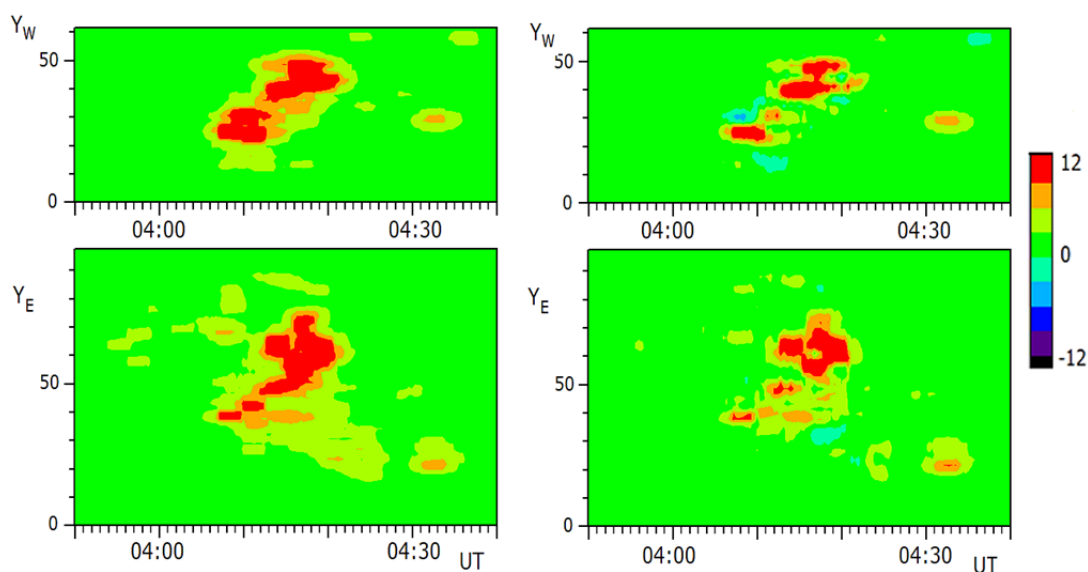


Рис. 4.

Рассмотрим теперь мелкомасштабную структуру пространственно-временных зависимостей яркости лент, которая, очевидно, ответственна за КПП в их интегральной яркости. Она была выделена путем исключения временного тренда из зависимостей яркости, показанных на рис. 2, при этом исключались периоды более 3 мин. На рис. 4, слева, показаны пространственно-временные зависимости амплитуды $A(Y, t)$ выделенных вариаций минутного диапазона (временное разрешение 4 мин).

Из сравнения рис. 4 с рис. 2 можно заключить, что в W-ленте область больших значений $A(Y, t)$ соответствует крупномасштабному распределению яркости, т.е. смещается с юга на север. В E-ленте соответствие $A(Y, t)$ с крупномасштабным распределением яркости выражено значительно слабее, особенно в южной части ленты, при этом максимум $A(Y, t)$ в целом смещается с юга на север, также как и в W-ленте.

Чтобы получить информацию о фазах минутных вариаций яркости, мы использовали следующий способ. Пусть $B_D(Y, t)$ – яркость ленты (без тренда), а $I_D(t)$ – некоторый сигнал сравнения. Рассчитываем функцию

$$K(Y, t) = \langle B_D(Y, t) \cdot I_D(t) \rangle_\tau / \langle I_D^2(t) \rangle_\tau^{1/2}$$

где $\langle \dots \rangle_\tau$ – скользящее среднее по t . Для квазипериодических вариаций

$$K(Y, t) \approx A(Y, t) \cdot \cos[\Delta\phi(Y, t)], \text{ где } \Delta\phi(Y, t) \text{ – разность фаз } B_D(Y, t) \text{ и } I_D(t).$$

В качестве сигнала сравнения нами использовался независимо измеренный параметр – интегральный поток ЖР излучения в полосе 20-50 кэВ (см. рис. 1), из которого был удален тренд. Полученные функции $K(Y, t)$ для обеих лент показаны на рис. 4, справа. Сравнение их с левым графиком рис. 4 показывает, что почти повсюду в тех областях, где амплитуда вариаций яркости лент не мала, $K(Y, t) > 0$, т.е. вариации яркости в разных участках лент происходят приблизительно в фазе с вариациями ЖР излучения, и приблизительно в фазе друг с другом. Функции $K(Y, t)$ выявляют еще одну особенность минутных вариаций яркости – признаки их пространственной (вдоль оси Y) модуляции с масштабом $\approx 8''$.

Выводы

Исследование яркости вспышечных лент свидетельствует о структурированности процесса энерговыведения на разных пространственных и временных масштабах. При этом выделяются два основных типа структур: (1) – крупномасштабные структуры в виде перемещающихся вдоль лент "волн" яркости с пространственным масштабом 20–25", причем в восточной и западной лентах их перемещение происходит в противоположных направлениях и с разной скоростью; (2) – вариации яркости минутного диапазона (3 мин и короче), которые проявляются как КПП в интегральной яркости лент, а также в интегральных потоках ЖР и радиоизлучения. Амплитуда минутных вариаций модулируется крупномасштабной "волной", распространяющейся на север, а также пространственной структурой меньшего масштаба $\sim 8''$.

Литература

1. Ерофеев Д.В., Кузьменко И.В. Квазипериодические пульсации в радио и других диапазонах спектра во время солнечной вспышки класса М // Тезисы докладов на Всероссийской конференции «Магнетизм и активность Солнца – 2024», 1–5 июля 2024 г., КрАО РАН, <https://sun.crao.ru/images/conference/2024/report/Erofeev.pdf>