

## МЕТОД ОЦЕНКИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПЕРИОДА ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ

Л.С. Леденцов

Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга  
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия,  
leonid.ledentsov@gmail.com

Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

## A METHOD FOR ESTIMATING THE SPATIAL PERIOD OF ENERGY RELEASE IN SOLAR FLARES

L.S. Ledentsov

Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, Russia,  
leonid.ledentsov@gmail.com  
Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Аннотация.** С целью анализа современных спутниковых наблюдений аркад вспышечных корональных петель предложен метод оценки пространственного периода энерговыделения в солнечных вспышках. Метод основывается на применении анализа Фурье к разностным изображениям вспышечных аркад в далеком ультрафиолетовом диапазоне. Работа метода продемонстрирована на примере наблюдения Бастильской вспышки с космического аппарата TRACE в канале 171 Å. Среднее значение пространственного периода энерговыделения в Бастильской вспышке, определенное предложенным методом, составляет 5–8 Мм, что хорошо согласуется со сценарием развития тепловой неустойчивости предвспышечного токового слоя в солнечных вспышках.

**Ключевые слова:** солнечные вспышки, тепловая неустойчивость, вакуумный ультрафиолет, анализ Фурье.

**Abstract.** A method for estimating the spatial period of energy release in solar flares is proposed to analyze the present-day satellite observations of arcades of flare coronal loops. The method is based on the application of a Fourier analysis to the difference images of flare arcades in the far ultraviolet. The operation of the method is demonstrated with the observations of the Bastille Day flare from the TRACE spacecraft in the 171 Å channel. The mean spatial period of energy release in the Bastille Day flare determined by the proposed method is 5–8 Mm, in good agreement with the scenario for the development of thermal instability of the preflare current layer in solar flares.

**Keywords:** solar flares, thermal instability, vacuum ultraviolet, Fourier analysis

### ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия космические обсерватории позволили изучать развитие солнечных вспышек во всех диапазонах электромагнитного излучения [Benz, 2017]. Яркие корональные вспышечные петли в крайнем ультрафиолете — одно из наиболее зрелищных проявлений солнечной активности, доступное для детальных наблюдений. Сложная структура распределения ярких петель в пространстве указывает на неоднородность первичного энерговыделения во вспышке [Krucker et al., 2003; Reva et al., 2015]. Тем не менее зачастую можно отметить некоторую квазипериодичность в пространственном распределении ярких петель во вспышечной аркаде. Отличным примером вспышки с хорошо структурированной вспышечной аркадой и квазипериодическим расположением ярких петель служит Бастильская вспышка, произошедшая 14 июля 2000 г. [Aulanier et al., 2000; Somov et al., 2002].

### НАБЛЮДЕНИЯ

Солнечные вспышки — сложный многоступенчатый процесс преобразования свободной энергии магнитного поля в энергию электромагнитного излучения, а также теплового и направленного движения частиц. Электроны, ускоренные в процессе первичного энерговыделения, опускаясь вдоль линий магнитного поля в хромосферу, вызывают ее нагрев и дальнейшее расширение вдоль соответствующих трубок

магнитного поля. Тепловое излучение расширяющейся плазмы подсвечивает отдельные яркие петли во вспышечной аркаде. Таким образом, расположение ярких магнитных петель во вспышечной аркаде несет в себе информацию о расположении областей первичного энерговыделения. Однако первичное ускорение электронов носит импульсный характер, в то время как остывание горячих магнитных петель в результате излучения электромагнитных волн происходит медленно. Солнечная вспышка в процессе своего развития содержит серию актов импульсного ускорения частиц. Подсвеченные петли магнитного поля, пересекаясь по времени своего существования, формируют видимую картину вспышечной аркады. Таким образом, в каждый отдельный момент времени вспышечная аркада состоит из ярких петель, подсвеченных различными элементарными актами энерговыделения во вспышке.

В качестве примера для демонстрации метода определения межпетельного расстояния используем наблюдения Бастильской вспышки с космического аппарата TRACE в дальнем ультрафиолетовом диапазоне, а именно, в линии 171 Å [Handy et al., 1999]. В этом канале наиболее отчетливо наблюдались вспышечные петли, именно поэтому он был выбран для демонстрации работы метода. В дальнейших исследованиях метод можно применять к другим ультрафиолетовым каналам. Пример одного изображения Бастильской вспышки можно видеть на рис. 1 слева.

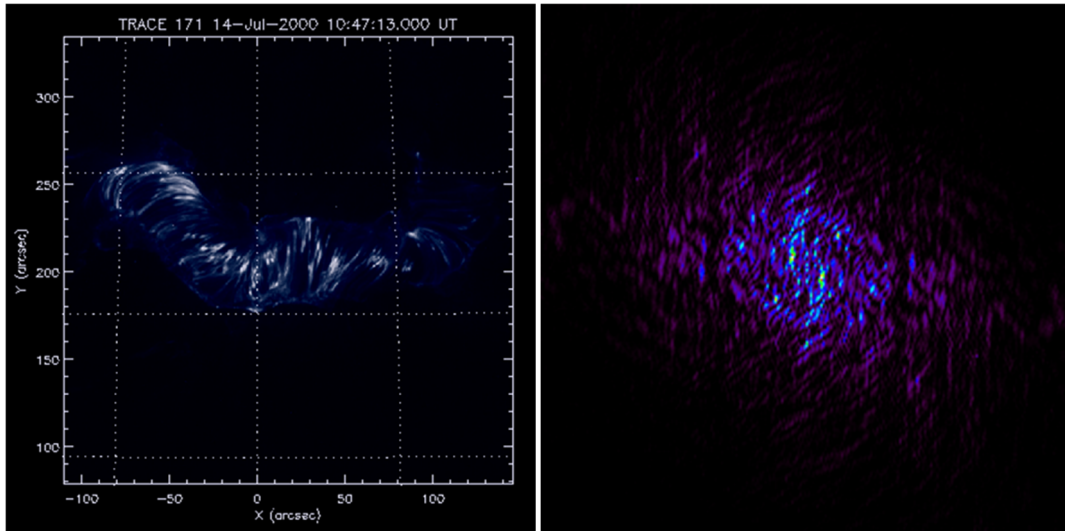


Рис. 1. Слева изображение Бастильской вспышки в канале 171 Å, спутника TRACE. Справа увеличенная центральная часть спектра мощности возмущений разностного изображения

## МЕТОД

Исходными данными для поиска пространственного периода первичного энерговыделения служит серия снимков вспышечной аркады. Прежде всего снимки нормализуются по времени экспозиции. Затем на каждом снимке необходимо выделить новые образования, для этого используем попарную разность между последовательными кадрами серии. Пространственный период возмущений на разностных изображениях будем выделять с помощью анализа Фурье. Для этого из каждого разностного изображения вычитается среднее по изображению, а затем к результату применяется быстрое преобразование Фурье. На рис. 1 справа представлен пример двумерного спектра мощности разностного изображения  $S$ . Цветом отмечена мощность возмущения с индексами волновых чисел  $k_x$  и  $k_y$ , отложенными в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно. В центре рисунка отмечена мощность возмущения с  $k_x = k_y = 0$ , т.е. средняя мощность интенсивности всего изображения. Чем дальше от центра, тем меньшие пространственные периоды  $\lambda = L/k$  видны на спектре

мощности. Здесь  $L$  — размер участка Солнца, видимый на изображении по обеим координатам,  $\lambda$  — пространственный период возмущения. При наличии выделенного направления у возмущения спектр мощности теряет радиальную симметрию, вытягиваясь вдоль волнового вектора доминирующего возмущения. Однако на спектре сохраняются центральная симметрия и зеркальная симметрия относительно направления доминирующего волнового вектора. Последнее свойство позволяет нам свернуть двумерный спектр мощности по направлению, ортогональному к доминирующему волновому вектору (рис. 2).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В табл. 1 представлены средние значения пространственных периодов наблюдаемых возмущений и их среднеквадратичные отклонения, количество найденных возмущений, удовлетворяющих пороговому критерию, а также количество разностных изображений, на которых эти возмущения обнаружены. Наблюдается постепенный рост

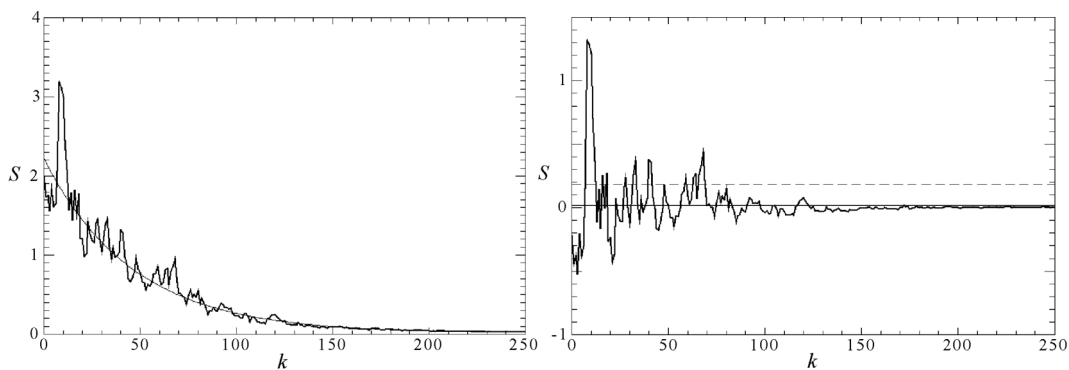


Рис. 2. Слева одномерный спектр мощности возмущений, тонкой линией нанесен фитированный экспоненциальный тренд. Справа одномерный спектр мощности возмущений за вычетом экспоненциального тренда, тонкой сплошной линией нанесено среднее значение мощности, штриховой — уровень  $1\sigma$  над средним

среднего периода от  $\sim 5$  до  $\sim 8$  Мм при увеличении порогового критерия от  $1\sigma$  до  $5\sigma$ . Критерий  $6\sigma$  снижает средний период до  $\sim 7$  Мм. Описанное поведение соответствует теоретическому представлению о работе предложенного метода поиска пространственных периодов энерговыделения в солнечных вспышках. Одномерный спектр мощности содержит набор возмущений при разных индексах  $k$ . Из-за наблюдаемой экспоненциальной структуры спектра возмущения с меньшим пространственным периодом  $\lambda$  (большим индексом  $k$ ) в среднем имеют меньшую амплитуду. Поэтому при увеличении порогового критерия первыми отсеиваются именно они, что приводит к росту среднего периода возмущений. Более подробное исследование метода оценки пространственного периода энерговыделения можно прочитать в [Леденцов, 2023].

Таблица 1.

**Пространственные периоды энерговыделения.**

Пороговый критерий	$1\sigma$	$2\sigma$	$3\sigma$	$4\sigma$	$5\sigma$	$6\sigma$
Средний пространственный период, Мм	5.6	6.7	7.9	7.8	8.3	7.2
Среднеквадратичное отклонение, Мм	3.0	2.9	2.8	2.5	2.8	2.5
Число детектированных возмущений	514	208	91	34	12	5
Число возмущенных кадров	58	49	42	27	12	5

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Разработан метод поиска пространственных периодов энерговыделения в солнечных вспышках, основанный на применении анализа Фурье к разностным изображениям вспышечных аркад в далеком ультрафиолетовом диапазоне. Показана эффективность метода на примере анализа вспышечной аркады Бастильской вспышки. Среднее значение

пространственного периода энерговыделения в Бастильской вспышке, определенное предложенным методом, составило 5–8 Мм, что хорошо согласуется со сценарием развития тепловой неустойчивости предвспышечного токового слоя в солнечных вспышках [Ledentsov, 2021a–c].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-30002, <https://rscf.ru/project/23-72-30002/>.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

Леденцов Л.С. Метод оценки пространственного периода энерговыделения в солнечных вспышках // Письма в Астрон. журн. 2023. Т. 49, № 11. С. 819–828.

Aulanier G., DeLuca E.E., Antiochos S.K. et al. The Topology and Evolution of the Bastille Day Flare // *Astrophys. J.* 2000. V. 540. P. 1126.

Benz A.O. Flare Observations // *Liv. Rev. Solar Phys.* 2017. V. 14. N. 2.

Handy B.N., Acton L.W., Kankelborg C.C. et al. The Transition Region and Coronal Explorer // *Solar Phys.* 1999. V. 187. P. 229.

Krucker S., Hurford G.J., Lin R.P. Hard X-Ray Source Motions in the 2002 July 23 Gamma-Ray Flare // *Astrophys. J.* 2003. V. 595, N L103.

Ledentsov L. Thermal Trigger for Solar Flares I: Fragmentation of the Preflare Current Layer // *Solar Phys.* 2021. V. 296. N. 74.

Ledentsov L. Thermal Trigger for Solar Flares II: Effect of the Guide Magnetic Field // *Solar Phys.* 2021. V. 296, N. 93.

Ledentsov L. Thermal Trigger for Solar Flares III: Effect of the Oblique Layer Fragmentation // *Solar Phys.* 2021. V. 296, N 117.

Reva A., Shestov S., Zimovets I. et al. Wave-like Formation of Hot Loop Arcades // *Solar Phys.* 2015. V. 290. P. 2909.

Somov B.V., Kosugi T., Hudson H.S. et al. Magnetic Reconnection Scenario of the Bastille Day 2000 Flare // *Astrophys. J.* 2002. V. 579. P. 863.