

МЕТОД ОЦЕНКИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПЕРИОДА ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ

© 2023 г. Л. С. Леденцов^{1,2*}

¹Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 16.10.2023 г.

После доработки 18.11.2023 г.; принята к публикации 21.11.2023 г.

С целью анализа современных спутниковых наблюдений аркад вспышечных корональных петель предложен метод оценки пространственного периода энергосвободного выделения 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 энергосвободного выделения 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, магнитные петли, крайний ультрафиолет.

DOI: 10.31857/S0320010823110062, **EDN:** RYSFIE

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия космические обсерватории позволили изучать развитие солнечных вспышек во всех диапазонах электромагнитного излучения (Бенц, 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 энергосвободного выделения во вспышке (Крукер и др. 2003; Рева и др., 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. (Оланье и др., 2000; Сомов и др., 2002).

Согласно современным представлениям, перед вспышкой над аркадой магнитных петель формируется тонкий токовый слой (Прист, Форбс, 2002; Сомов, 2013; Ториуми, Ванг, 2019). Токовый слой в начале своего развития разделяет сталкивающиеся магнитные потоки, препятствуя их перезамыканию.

Это приводит к накоплению свободной энергии в непотенциальном магнитном поле, связанном с электрическим током токового слоя. При разрушении предвспышечного токового слоя свободная энергия магнитного поля реализуется в виде солнечной вспышки (Орешина, Сомов, 1998; Сомов, Орешина, 2000; Узденский, 2007). Процесс преобразования энергии может идти долгим путем. От пересоединяющего токового слоя в короне энергия переносится ускоренными частицами в хромосферу, откуда расширяющаяся разогретая плазма возвращает ее в корональные петли, чтобы, остывая, высветить в виде электромагнитного излучения. Все перечисленные процессы, имея общую плазменную природу, связаны магнитными полями так, что расположение ярких петель во вспышечной аркаде говорит также и о расположении областей первичного энергосвободного выделения в пересоединяющем токовом слое.

Настоящая работа представляет метод оценки пространственного периода первичного энергосвободного выделения в солнечных вспышках на основе анализа Фурье вспышечных ультрафиолетовых аркад магнитных петель. Актуальность работы обусловлена существованием множества механизмов, приводящих к квазипериодическому разрушению токового слоя в пространстве. Среди них можно выделить развитие тиринг-неустойчивости (Фюрс

*Электронный адрес: leonid.ledentsov@gmail.com

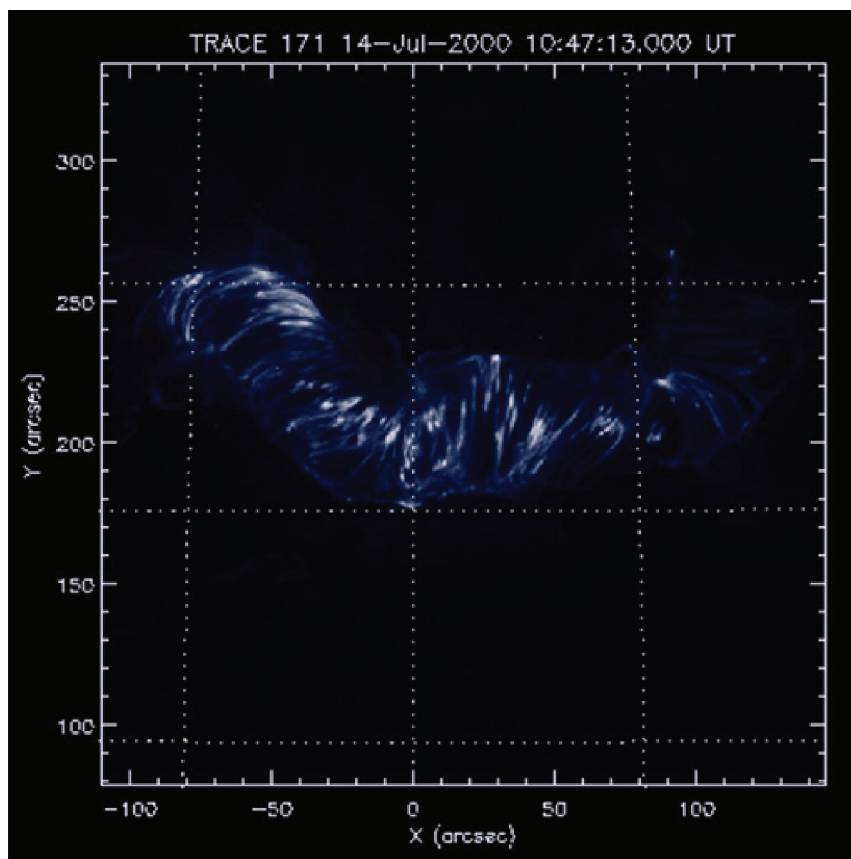


Рис. 1. Пример одного кадра Бастильской вспышки в канале $171 \text{ \AA}$, снятой с космического аппарата TRACE. По осям отложен размер поля зрения телескопа, пунктиром на снимке — ячейки $5^\circ \times 5^\circ$ на поверхности Солнца.

и др., 1963; Сомов, Вернета, 1993), взаимодействие токового слоя с магнитогидродинамическими волнами (Ворпал, 1976; Накаряков и др., 2006; Артемьев, Зимовец, 2012), плазменные неустойчивости корональной аркады (Климушкин и др., 2017), тепловые неустойчивости токового слоя (Филд, 1965; Сыроватский, 1976; Сомов, Сыроватский, 1982). Так, модель тепловой неустойчивости предсказывает разрушение предвспышечного токового слоя с пространственным периодом $1\text{--}10 \text{ Мм}$ в широком диапазоне возможных корональных характеристик плазмы (Леденцов, 2021a,b,c). Помимо пространственной неоднородности энерговыделения в солнечных вспышках показывает сложную динамику во времени, так называемые квазипериодические пульсации. Подробную информацию о квазипериодических неустойчивостях в солнечных вспышках и их наблюдательных проявлениях см. в обзоре Зимовец и др. (2021), а также цитируемой в нем литературе.

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

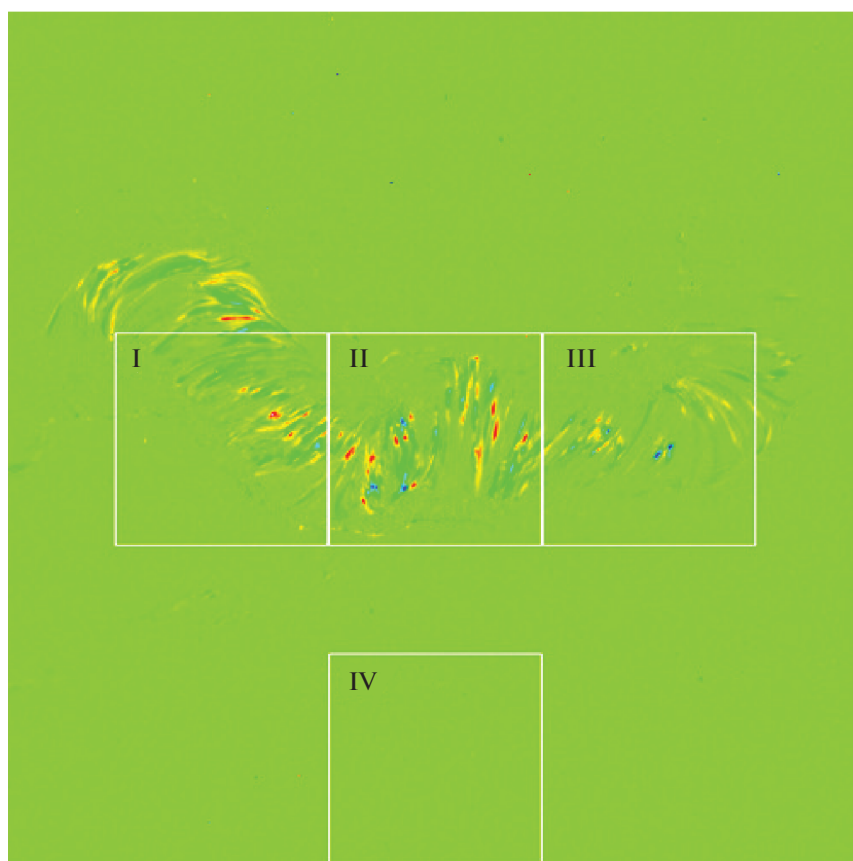


Рис. 2. Пример разностного изображения двух последовательных снимков вспышечной аркады Бастильской вспышки. Белыми квадратами отмечены исследуемые области: I–III — на вспышечной аркаде, IV — в спокойном регионе.

энерговыведения во вспышке. С целью определения пространственной периодичности первичного энерговыведения будем выделять одновременно подожженные петли во вспышечной аркаде. Для этого воспользуемся разностными изображениями между двумя соседними снимками.

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 $171 \text{ \AA}$ (Ханди и др., 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. Бастильская вспышка имела хорошо структурированную вспышечную аркаду, протянувшуюся примерно на 15° в направлении восток-запад вблизи центра солнечного диска (рис. 1). Благодаря наглядной геометрии магнитных полей и удачному расположению на диске Солнца вспышка получила широкую популярность среди исследователей (Оланье и др., 2000; Сомов и др., 2002). В дальней-

шем будем использовать ряд наблюдений с 10:26 до 11:10 со средней каденцией 44 с — всего 60 кадров. Ограничение по времени связано, во-первых, с режимом работы телескопа, а во-вторых, с частотой кадров. Так, до 10:26 на телескоп попадал поток заряженных частиц, оставляя характерный “снег” на приемнике, а после 11:10 прекратилась серийная съемка в канале $171 \text{ \AA}$. Поле зрения телескопа TRACE составляет $8.5' \times 8.5'$. При размере матрицы приемника в 1024×1024 пикселя для центра диска Солнца на 1 пиксель приходится около 0.4 Мм поверхности. Учитывая небольшую удаленность Бастильской вспышки от центра диска Солнца, будем пренебрегать эффектами проекции и использовать оценку 0.4 Мм на пиксель для пересчета размеров на изображениях в физические расстояния в солнечной атмосфере.

МЕТОД

Исходными данными для поиска пространственного периода первичного энерговыведения служит серия снимков вспышечной аркады, т.е. куб данных размером $x \times y \times n$, где x и y —

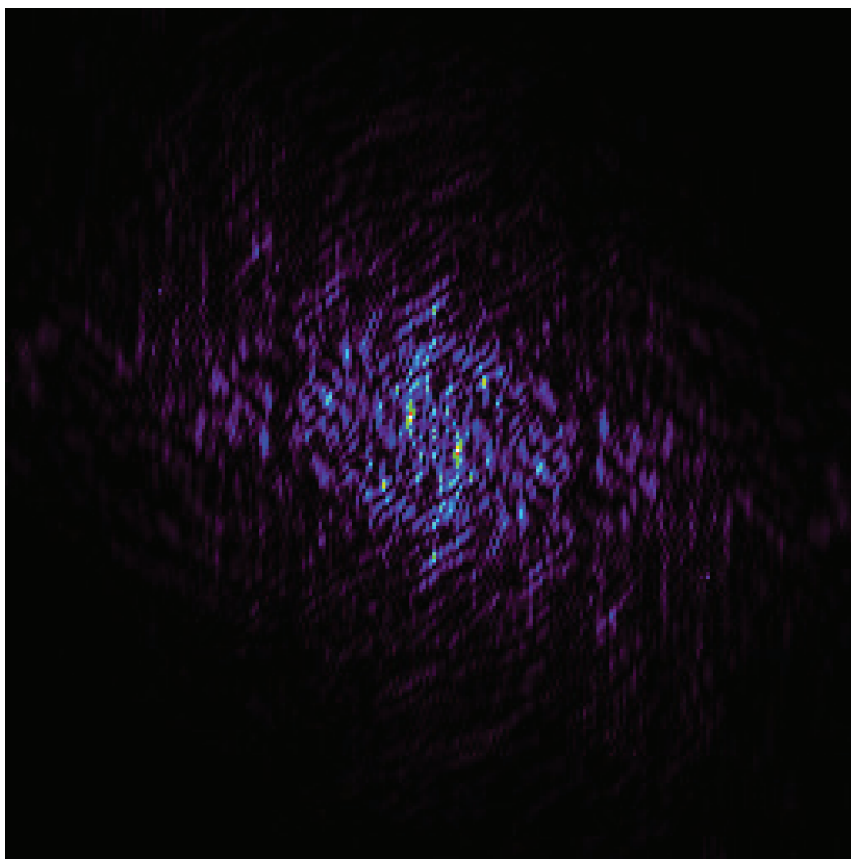


Рис. 3. Пример двумерного спектра мощности возмущений разностного изображения полного кадра. Представлена увеличенная центральная часть, пример полного спектра см. на рис. 5.

горизонтальный и вертикальный размеры снимка в пикселях, а n — количество снимков. Прежде всего снимки нормализуются по времени экспозиции. Затем на каждом снимке необходимо выделить новые образования, для этого будем брать попарную разность между последовательными кадрами серии. Считаем все изменения вспышечной аркады, произошедшие между двумя последовательными снимками одновременными, т.е. результатом одного и того же акта ускорения частиц. Данное утверждение будет тем более справедливым, чем меньше каденция телескопа — временной интервал между двумя последовательными снимками. В то же время при очень малой каденции возможно отсутствие качественных изменений в структуре вспышечной аркады для некоторых пар кадров из-за отсутствия вспышечного энерговыделения в затронутый ими интервал времени. Каденция телескопа TRACE достаточно большая, чтобы воспользоваться полной серией снимков для демонстрации работы метода.

После взятия разности изображений размер куба данных сокращается до $x \times y \times n - 1$. Дальнейшие процедуры проводятся с каждым из $n - 1$ слоев куба данных независимо. Рисунок 2 демонстри-

рует пример одного из разностных изображений. Здесь и далее в качестве примера используются 31-й разностный кадр и его обработка. Цветовая гамма показывает значение разности интенсивности двух кадров с максимальными амплитудами у синего и красного оттенков и нулем у зеленого. Таким образом, на рис. 2 изображено возмущение вспышечной аркады, спровоцированное первичным энерговыделением. Помимо полного снимка для анализа межпетельных расстояний выделены три области во вспышечной аркаде. Области I и II содержат участки вспышечной аркады с параллельно ориентированными петлями магнитного поля, при этом петли в области II лежат вдоль расположения пикселей на изображении, а область I — под углом около 45° . Область III, напротив, содержит петли различной ориентации. Область IV — контрольная, расположена вне вспышечной аркады. Проведем поиск пространственного периода возмущения для областей I, II, III и IV, а также для всего кадра независимо, а затем сравним результаты.

Пространственный период возмущений на разностных изображениях будем выделять с помощью



Рис. 4. То же, что рис. 3, но для области IV.

анализа Фурье. Для этого из каждого разностного изображения вычитается среднее по изображению, а затем к результату применяется быстрое преобразование Фурье. Алгоритм быстрого преобразования Фурье требует использования изображения с размером стороны кадра, равным одной из натуральных степеней числа 2. По этой причине основной кадр на рис. 2 обрезан до размера 512×512 , а области I, II и III имеют размер 128×128 . Квадрат фурье-образа дает двумерный спектр мощности сигнала S . Абсолютные значения мощности S нас не интересуют, поэтому не будем применять при ее определении никакой нормировки, а откладывать мощность S на графиках будем в условных расчетных единицах. Отметим, что выбор преобразования Фурье в качестве математического аппарата связан с большой каденцией в наблюдениях: на один временной шаг приходится множество перекрывающихся актов энерговыделения. При дальнейшем развитии метода можно перейти к вейвлет-преобразованию, позволяющему плавно отслеживать эволюцию спектра сигнала во времени.

На рис. 3 и 4 представлены примеры увеличенной центральной части двумерного спектра мощности разностного изображения полного кадра и

области IV. Цветом отмечена мощность возмущения с индексами волновых чисел $k_x = L/\lambda_x$ и $k_y = L/\lambda_y$, отложенными в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно. Здесь L — размер участка Солнца, видимый на изображении по обоим координатам, λ — пространственный период возмущения. В центре рисунка отмечена мощность возмущения с $k_x = k_y = 0$, т.е. средняя мощность интенсивности всего изображения. Рисунки 3 и 4 имеют очевидные различия: если для спокойной области IV на рис. 4 в двумерном спектре мощности доминирует именно средняя интенсивность всего изображения, то спектр мощности полного разностного изображения на рис. 3 содержит заметные возмущения на различных пространственных масштабах. Чем дальше от центра, тем меньшие пространственные периоды $\lambda = L/k$ видны на спектре мощности. Если присутствующие на изображении возмущения не имеют выделенного направления, то спектр мощности обладает радиальной симметрией. В гелиосейсмологии такой радиально симметричный спектр мощности возмущения называется “кольцевой диаграммой” (Гизон, Берч, 2005). При наличии выделенного направления у возмущения спектр мощности теряет

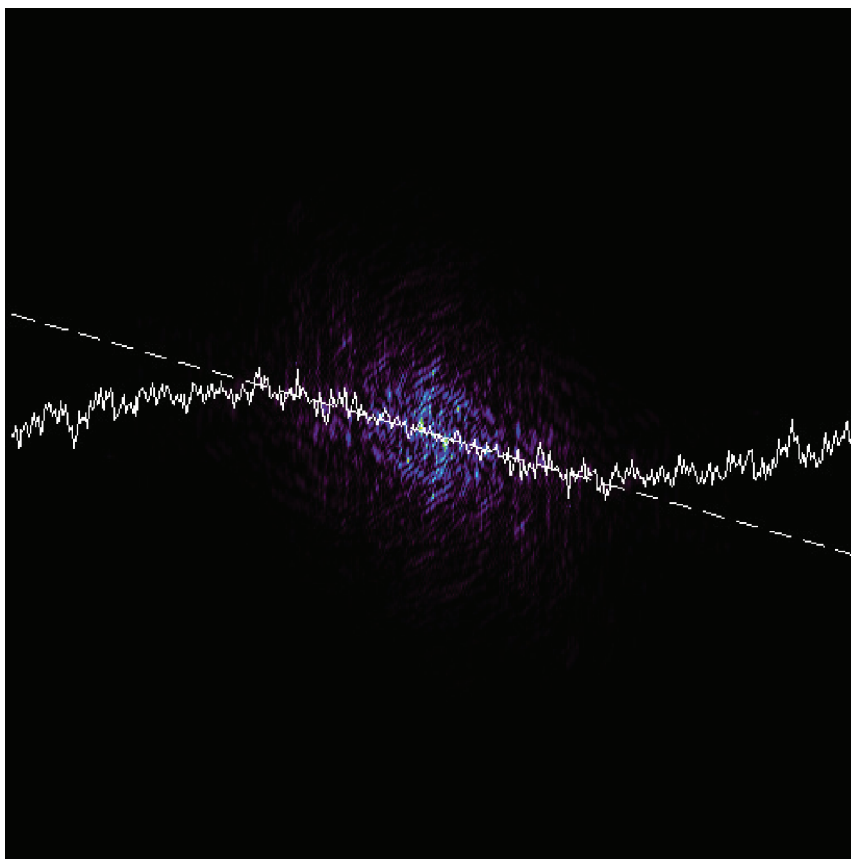


Рис. 5. Пример двумерного спектра мощности возмущений полного кадра. Поверх двумерного спектра мощности сплошной линией нанесено положение “центра масс” столбцов пикселей. Штриховая линия проведена по “центрам масс” взвешенным методом наименьших квадратов.

радиальную симметрию, вытягиваясь вдоль волнового вектора доминирующего возмущения, как это видно на рис. 3. Однако в этом случае сохраняются центральная симметрия рисунка и зеркальная симметрия относительно направления доминирующего волнового вектора.

Последнее свойство позволяет нам свернуть двумерный спектр мощности по одному из направлений. Определим “центр масс” каждого столбца пикселей двумерного спектра, где в качестве “массы” пикселя будет выступать его интенсивность, и присвоим ему вес, пропорциональный полной “массе” столбца. Это позволяет взвешенным методом наименьших квадратов определить наклон оси симметрии двумерного спектра мощности (рис. 5). Для того чтобы свернуть двумерный спектр, остается повернуть его на угол наклона оси симметрии и просуммировать все строки полученного изображения. Затем одну половину суммарной строки можно отбросить в силу центральной симметрии исходного рисунка. Таким образом, двумерный спектр мощности преобразуется к одномерному, описывающему возмущение с доминирующим на-

правлением волнового вектора и шумом из проекций возмущений других направлений.

Примеры итогового одномерного спектра мощности для полного кадра и области IV представлены на рис. 6 и 7 толстой линией. Обращает на себя внимание разница в три порядка между отсчетами мощности на двух графиках. Спектр мощности содержит экспоненциальный тренд и набор возмущений, соответствующих различным волновым числам. Для определения значимых возмущений воспользуемся следующим алгоритмом. Сперва вычтем из спектра медленный тренд. Его фитирование проводится экспоненциальной функцией с весами, обратно пропорциональными величине отсчетов в спектре, на рис. 6 и 7 оно нанесено тонкой линией. Разница спектра и его фитирования представлена на рис. 8 и 9 толстой линией. Теперь для спектра без тренда определим среднее значение и стандартное отклонение σ . На рис. 8 и 9 их величины отмечены сплошной и штриховой горизонтальными линиями соответственно. В качестве значимых возмущений примем каждый локальный максимум спектра, отклоняющийся от среднего значения на условленное

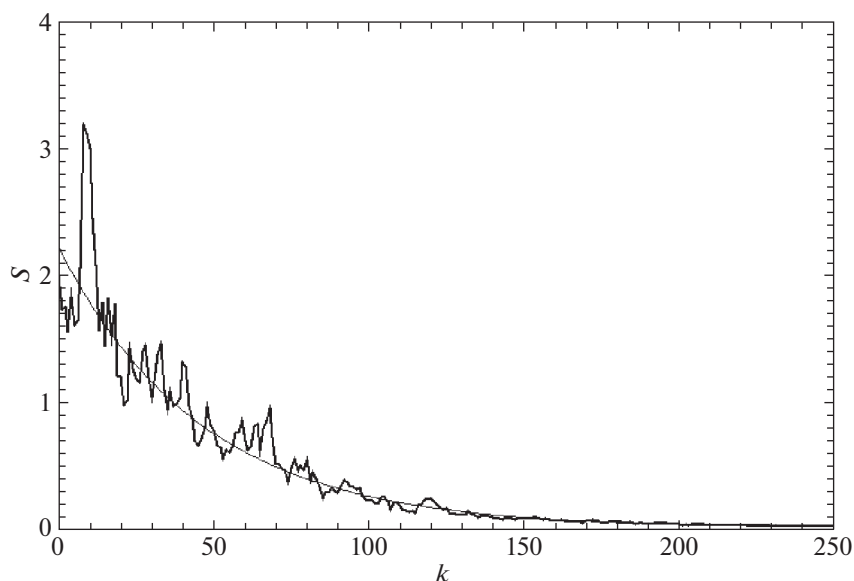


Рис. 6. Пример одномерного спектра мощности возмущений полного кадра. Тонкой линией нанесен фитированный экспоненциальный тренд.

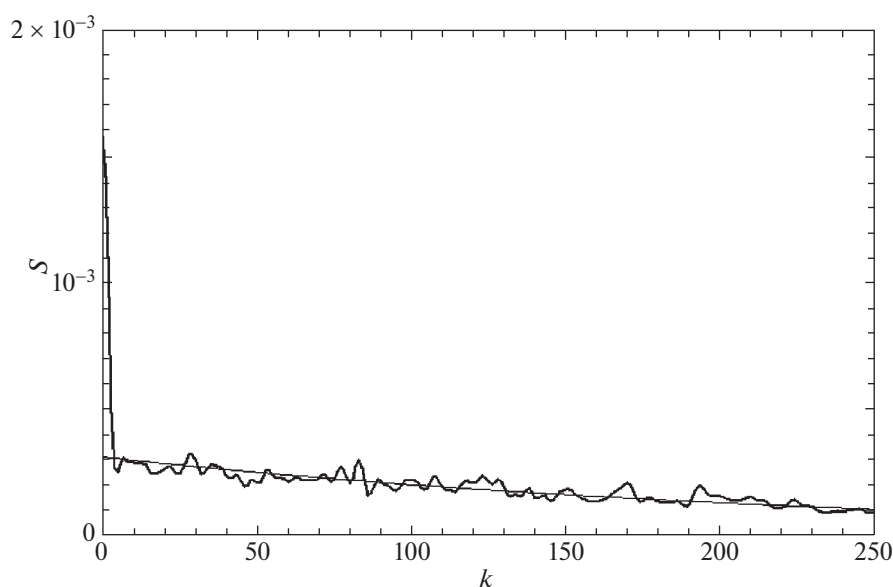


Рис. 7. То же, что рис. 6, но для области IV.

число стандартных отклонений σ — пороговый критерий. На рис. 9 величину 1σ не превышает ни одно возмущение, кроме нулевого отсчета по k . Найденные таким образом значения волновых чисел возмущений могут быть преобразованы в искомые пространственные периоды первичного энерговыделения во вспышке. При дальнейшей обработке не принимались во внимание возмущения больших масштабов, на рис. 6 и 8 примером такого возмущения служит высокий пик вблизи $k = 10$. Возмущения больших масштабов описывают вариации фоновой яркости кадра, а не вспыхивающие петли магнитного поля. Они имеют заметно более

высокую мощность и не фильтруются пороговыми критериями. В этом исследовании не рассматриваются возмущения с пространственным периодом более 14 Мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В табл. 1 представлены средние значения пространственных периодов наблюдаемых возмущений для областей I–IV по отдельности и для всего снимка целиком. В скобках дополнительно указано количество найденных возмущений, удовлетворяющих пороговому критерию, а также количество

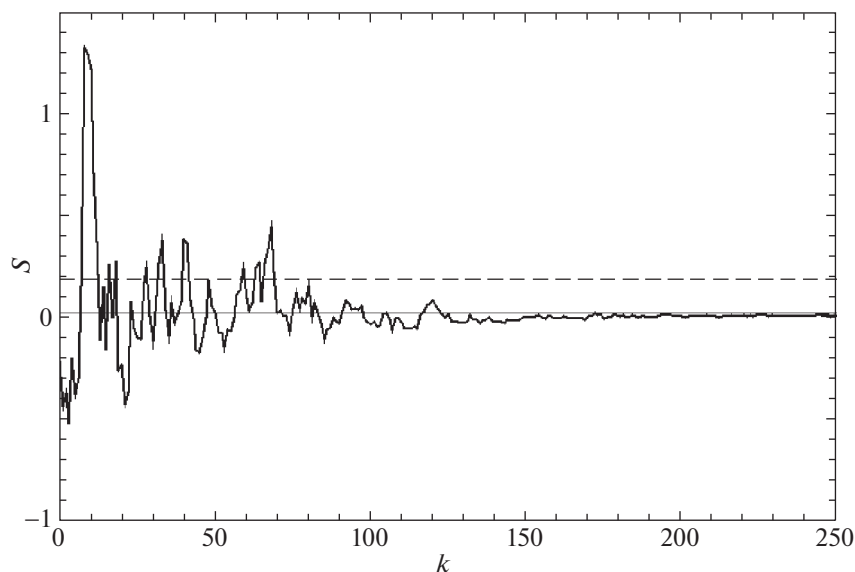


Рис. 8. Пример одномерного спектра мощности возмущений полного кадра за вычетом экспоненциального тренда. Тонкой сплошной линией нанесено среднее значение мощности, штриховой — уровень 1σ над средним.

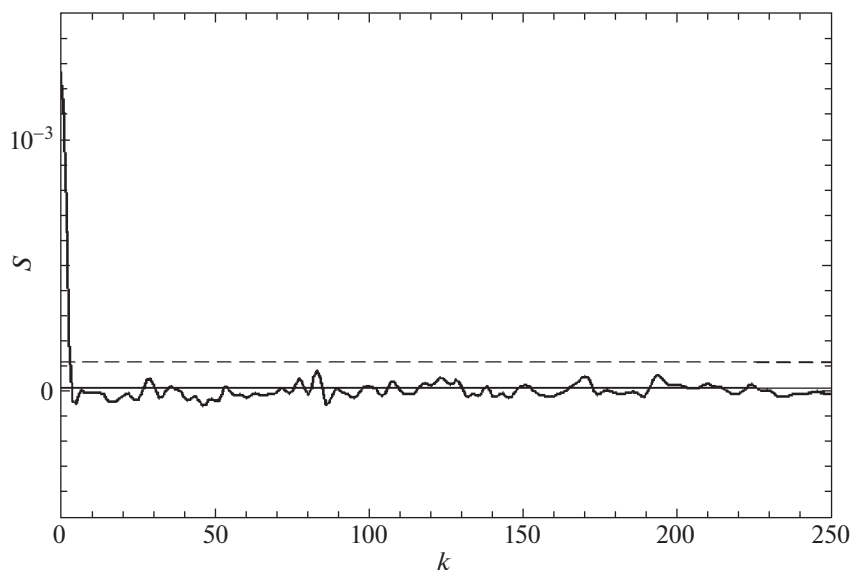


Рис. 9. То же, что рис. 8, но для области IV.

разностных изображений, на которых эти возмущения обнаружены. Все исследованные области за исключением контрольной области IV показывают результаты, схожие с результатом полного кадра. Для них всех характерен постепенный рост среднего периода от ~ 5 до ~ 8 Мм при увеличении порогового критерия от 1σ до 5σ . Критерий 6σ снижает средний период до ~ 7 Мм как в области II, так и на полном кадре. В остальных областях найдено не более одного возмущения, удовлетворяющего критерию 6σ . Область IV, напротив, показывает снижение среднего периода от ~ 3 до ~ 2 Мм при увеличении порогового критерия от 1σ до 5σ . Кроме того, в области IV найдено заметно меньшее количество возмущений по срав-

нению с другими областями. Для критериев 2σ — 5σ возмущений в области IV примерно в 3 раза меньше, чем в любой из областей I–III. Кроме того, возмущения в области IV обнаруживаются на меньшем количестве разностных кадров. Так, по критерию 1σ в области IV возмущения обнаружены только на 30 разностных изображениях из 59, в то время как в остальных областях возмущения детектируются почти на всех разностных кадрах. Спектр мощности на рис. 9 относится к одному из разностных изображений, на которых возмущения не обнаружены.

Описанное поведение соответствует теоретическому представлению о работе предложенного метода поиска пространственных периодов энер-

Таблица 1. Пространственные периоды энерговыведения

Порог	Область I	Область II	Область III	Область IV	Весь кадр
1σ	5.1 ± 2.7 (354/58)*	5.3 ± 3.0 (375/59)	5.1 ± 3.2 (304/56)	3.0 ± 1.9 (260/30)	5.6 ± 3.0 (514/58)
2σ	5.9 ± 2.9 (167/53)	6.2 ± 3.0 (172/57)	6.3 ± 3.4 (153/56)	3.1 ± 1.3 (60/27)	6.7 ± 2.9 (208/49)
3σ	6.8 ± 3.3 (59/39)	6.4 ± 2.7 (77/45)	7.2 ± 3.4 (64/47)	2.5 ± 1.3 (15/12)	7.9 ± 2.8 (91/42)
4σ	7.5 ± 3.0 (23/20)	7.1 ± 2.4 (31/26)	7.9 ± 3.5 (27/25)	2.3 ± 1.3 (9/8)	7.8 ± 2.5 (34/27)
5σ	8.1 ± 4.9 (3/3)	7.9 ± 2.3 (12/11)	7.9 ± 3.8 (7/7)	1.8 ± 1.3 (6/6)	8.3 ± 2.8 (12/12)
6σ	—	6.7 ± 1.1 (4/4)	—	—	7.2 ± 2.5 (5/5)

* Средний период в Мм $\pm$ среднеквадратическое отклонение (число возмущений / число разностных кадров с возмущениями).

говыведения в солнечных вспышках. Во вспышечных областях одномерный спектр мощности возмущений, например, изображенный на рис. 6, содержит набор возмущений при разных индексах k . Из-за наблюдаемой экспоненциальной структуры спектра возмущения с меньшим пространственным периодом λ (большим индексом k) в среднем имеют меньшую амплитуду. Поэтому при увеличении порогового критерия в областях I–III первыми отсеиваются именно они, что приводит к росту среднего периода возмущений. В спокойной области одномерные возмущения имеют гладкую экспоненциальную структуру с небольшой примесью естественного шума. В отсутствие реальных возмущений алгоритм метода в основном детектирует естественный шум в спектре, который не имеет сильной тенденции уменьшать амплитуду с уменьшением пространственного периода. В итоге в области IV наблюдаются резкое падение числа детектируемых возмущений с ростом порогового критерия по сравнению с областями I–III и небольшое снижение среднего пространственного периода.

Разработанный метод автоматически детектирует направление волнового вектора доминирующего возмущения, что позволяет применять его как ко всей вспышечной аркаде, так и к отдельной ее части. При выборе исследуемой области стоит отметить следующие особенности. Увеличение области приводит к росту числа детектируемых возмущений, что можно видеть из сравнения результатов областей I–III и полного кадра. С другой стороны, рассматривая большую и сложную

по конфигурации вспышечную аркаду целиком, можно столкнуться с большим числом разнонаправленных сильных возмущений, что не позволит алгоритму корректно определить доминирующее направление. По этой причине метод требует дальнейшей апробации на различных вспышечных аркадах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод поиска пространственных периодов энерговыведения 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. Метод продемонстрировал схожие результаты для всех исследованных областей вспышки и может применяться как к отдельному участку вспышечной аркады, так и ко всей аркаде целиком. Среднее значение пространственного периода энерговыведения в Бастильской вспышке, определенное предложенным методом, составило 5–8 Мм, что хорошо согласуется со сценарием развития тепловой неустойчивости предвспышечного токового слоя в солнечных вспышках (Леденцов, 2021a,b,c). Разумеется, анализ лишь одного вспышечного события не может служить веским доводом в пользу той или иной теории. Сравнение результатов работы метода с теоретическим масштабом тепловой неустойчивости в рамках данной статьи служит лишь иллюстрацией практического применения представленного

алгоритма. Дальнейшее развитие метода требует его применения к большому числу вспышечных аркад, наблюдаемых в ультрафиолетовом диапазоне с высоким пространственным разрешением на таких космических телескопах, как TRACE, SDO, SoHO.

Работа основана на наблюдательных данных, полученных на космическом аппарате TRACE. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-72-30002, <https://rscf.ru/project/23-72-30002/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артемьев, Зимовец (A. Artemyev and I. Zimovets), *Solar Phys.* **277**, 283 (2012).
2. Бенц (A.O. Benz), *Living Rev. Sol. Phys.* **14**, 2 (2017).
3. Ворпал (J.A. Vorpahl), *Astrophys. J.* **205**, 868 (1976).
4. Гизон, Берч (L. Gizon and A.C. Birch), *Living Rev. Sol. Phys.* **2**, 6 (2005).
5. Зимовец и др. (I.V. Zimovets, J.A. McLaughlin, A.K. Srivastava, D.Y. Kolotkov, A.A. Kuznetsov, E.G. Kupriyanova, I.-H. Cho, A.R. Inglis, et al.), *Space Sci. Rev.* **217**, 66 (2021).
6. Климушкин и др. (D.Y. Klimushkin, V.M. Nakariakov, P.N. Mager, and O.K. Cheremnykh), *Solar Phys.* **292**, 184 (2017).
7. Крукер и др. (S. Krucker, G.J. Hurford, and R.P. Lin), *Astrophys. J.* **595**, L103 (2003).
8. Леденцов (L. Ledentsov), *Solar Phys.* **296**, 74 (2021a).
9. Леденцов (L. Ledentsov), *Solar Phys.* **296**, 93 (2021b).
10. Леденцов (L. Ledentsov), *Solar Phys.* **296**, 117 (2021c).
11. Накаряков и др. (V.M. Nakariakov, C. Foullon, E. Verwichte, and N.P. Young), *Astron. Astrophys.* **452**, 343 (2006).
12. Оланье и др. (G. Aulanier, E.E. DeLuca, S.K. Antiochos, R.A. McMullen, and L. Golub), *Astrophys. J.* **540**, 1126 (2000).
13. Орешина, Сомов (A.V. Oreshina and B.V. Somov), *Astron. Astrophys.* **331**, 1078 (1998).
14. Прист, Форбс (E.R. Priest and T.G. Forbes), *Astron. Astrophys. Rev.* **10**, 313 (2002).
15. Рева и др. (A. Reva, S. Shestov, I. Zimovets, S. Bogachev, and S. Kuzin), *Solar Phys.* **290**, 2909 (2015).
16. Сомов (B.V. Somov), *Plasma Astrophysics. Part II. Reconnection and Flares. Second Edition* (N.Y.: Springer SBM, 2013).
17. Сомов, Вернета (B.V. Somov and A.I. Verneta), *Space Sci. Rev.* **65**, 253 (1993).
18. Сомов и др. (B.V. Somov, T. Kosugi, H.S. Hudson, T. Sakao, and S. Masuda), *Astrophys. J.* **579**, 863 (2002).
19. Сомов, Орешина (B.V. Somov and A.V. Oreshina), *Astron. Astrophys.* **354**, 703 (2000).
20. Сомов, Сыроватский (B.V. Somov and S.I. Syrovatskii), *Solar Phys.* **75**, 237 (1982).
21. Сыроватский С.И., Письма в Астрон. журн. **2**, 35 (1976) [S.I. Syrovatskii, *Sov. Astron. Lett.* **2**, 13 (1976)].
22. Ториуми, Ванг (S. Toriumi and H. Wang), *Living Rev. Solar Phys.* **16**, 3 (2019).
23. Узденский (D.A. Uzdensky), *Astrophys. J.* **671**, 2139 (2007).
24. Филд (G.B. Field), *Astrophys. J.* **142**, 531 (1965).
25. Фюрс и др. (H.P. Furth, J. Killeen, and M.N. Rosenbluth), *Phys. Fluid.* **6**, 459 (1963).
26. Ханди и др. (B.N. Handy, L.W. Acton, C.C. Kankelborg, C.J. Wolfson, D.J. Akin, M.E. Bruner, R. Carvalho, R.C. Catura, et al.), *Solar Phys.* **187**, 229 (1999).