

МЕТОД ОЦЕНКИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПЕРИОДА ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ II

© 2025 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 24.01.2025 г.

После доработки 25.03.2025 г.; принята к публикации 01.04.2025 г.

Метод оценки пространственного периода энергосвечения в солнечных вспышках, основанный на применении анализа Фурье к разностным изображениям вспышечных аркад в далеком ультрафиолетовом диапазоне, опробован на наблюдениях крупной солнечной вспышки 4 ноября 2003 г. Вспышка произошла на краю диска Солнца; вспышечная аркада, протянувшаяся вдоль солнечного лимба, была подробно снята в ультрафиолетовом канале 195 Å спутника TRACE. Фурье-анализ разностных изображений показал наличие ряда гармоник в пространственном распределении областей энергосвечения вспышки с характерными периодами, лежащими в диапазоне от 3.3 до 18.6 Мм. Подобная периодизация может быть результатом распада предвспышечного токового слоя, аккумулирующего энергию солнечной вспышки в корональных магнитных полях, в связи с некоторой неустойчивостью тепловой, плазменной или иной природы.

Ключевые слова: солнечные вспышки, магнитные петли, крайний ультрафиолет.

DOI: 10.31857/S0320010825010054, EDN: LEMLSO

ВВЕДЕНИЕ

В предыдущей статье нами был предложен метод автоматической оценки пространственного периода энергосвечения в солнечных вспышках на основе Фурье-анализа ультрафиолетовых снимков солнечной короны (Леденцов, 2023). Аркады вспышечных петель магнитного поля содержат в себе информацию о пространственном распределении областей первичного энергосвечения. Вмороженность плазмы в сильное магнитное поле позволяет отследить причинно-следственные связи между различными физическими процессами в солнечной атмосфере, сопровождающими вспышку (Сомов, Сыроватский, 1976; Сомов, 2012). Так, распределение яркости петель во вспышечной аркаде говорит о том, в каких областях солнечной хромосферы произошел разогрев плазмы под действием вспышки. Таким образом, на основе наблюдений вспышечной аркады представляется возможным восстановить взаимное расположение областей интенсивного энергосвечения во вспышке.

Эта задача значительно осложняется тем, что первичное выделение энергии во вспышке имеет импульсный, скоротечный характер, а наблюдаемое ультрафиолетовое свечение вспышечных петель обусловлено медленными тепловыми процессами остывания плазмы (Бенц, 2017). По этой причине видимое распределение яркости в аркаде петель формируется наложением нескольких элементарных актов энергосвечения, разнесенных не только в пространстве, но и во времени (Крукер и др., 2003; Рева и др., 2015).

Для решения данной проблемы мы использовали разностные изображения последовательных ультрафиолетовых кадров вспышечной аркады. Медленно меняющиеся особенности на снимках вычитаются, и подчеркиваются последствия вспышек, произошедших между двумя кадрами. Далее к разностным изображениям применяется быстрое дискретное преобразование Фурье, позволяющее автоматизировать определение расположения аркады на кадре и оценку пространственного периода энергосвечения.

Как было показано на примере Бастильской вспышки в предыдущей статье (Леденцов, 2023), наш метод может применяться не только к отдельному участку аркады, но и ко всему кадру целиком. Метод автоматически определяет пространственные периоды по Фурье-спектру мощности возмущений, бегущих по вспышечной аркаде. В этой статье мы обращаем внимание на новую особенность спектра: возможность формирования в распределении областей первичного энергосвечения набора стабильных пространственных гармоник.

В настоящей работе мы не обсуждаем конкретные пусковые механизмы солнечных вспышек вообще и эруптивных вспышек в частности. Мы полагаем, что первичное энергосвечение во вспышке обусловлено нарушением устойчивости предвспышечного токового слоя, т.е. токового слоя, аккумулирующего свободную энергию непотенциальных корональных магнитных полей и еще не перешедшего в режим быстрого пересоединения с интенсивным ускорением заряженных частиц, который соответствует импульсной фазе солнечной вспышки (Прист, Форбс, 2002; Сомов, 2013; Ториуми, Ванг, 2019).

*Электронный адрес: leonid.ledentsov@gmail.com

В последние десятилетия широко обсуждаются так называемые квазипериодические пульсации в солнечных вспышках (Зимовец и др., 2021). Пульсации наблюдаются как периодическое или квазипериодическое энерговыделение во времени. Мы же заостряем наше внимание на периодичности энерговыделения в пространстве, хотя эти два явления могут быть друг с другом тесно связаны (Григис, Бенц, 2005). К квазипериодическому в пространстве разрушению токового слоя могут приводить различные неустойчивости. Они формируют наблюдаемое распределение областей быстрого энерговыделения, включая такие возможные особенности, как образование высоких гармоник. Здесь уместно провести аналогию с колебанием натянутой струны: формирование гармоник связано с образованием дополнительных узлов колебания на струне, помимо ее краев. Точно так же кратное увеличение узлов периодической неустойчивости токового слоя может формировать пространственные гармоники в распределении областей энерговыделения, наблюдаемые в Фурье-спектре мощности возмущений вспышечной аркады.

Наше исследование не касается вопроса природы неустойчивости, приводящей к солнечной вспышке. Эту роль могут выполнять тиринг-неустойчивости (Фюрс и др., 1963; Сомов, Вернета, 1993), взаимодей-

ствие токового слоя с магнитогидродинамическими волнами (Ворпал, 1976; Накаряков и др., 2006; Артемьев, Зимовец, 2012), плазменные неустойчивости корональной аркады (Климушкин и др., 2017) или же тепловые неустойчивости токового слоя (Филд, 1965; Сыроватский, 1976; Сомов, Сыроватский, 1982). Например, тепловой механизм разрушения предвспышечного токового слоя дает для солнечных вспышек пространственный период энерговыделения от 1 до 10 Мм и несколько больший с учетом наклонного распространения возмущения (Леденцов, 2021a, b, c).

НАБЛЮДЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Мы рассматриваем большую солнечную вспышку, произошедшую с 4 на 5 ноября 2003 г. на западном крае диска Солнца (Кэйн и др., 2005). При фиксации потока ретгеновского излучения произошло насыщение приемников GOES, поэтому точный рентгеновский класс вспышки многократно пересматривался различными авторами на основе косвенных измерений и оценивался в пределах X28–X48 (Бродрик и др., 2005). Вспышка произошла на солнечном лимбе таким образом, что вспышечная аркада магнитных петель протянулась вдоль солнечного лимба на десятки градусов и была хорошо отснята космическим

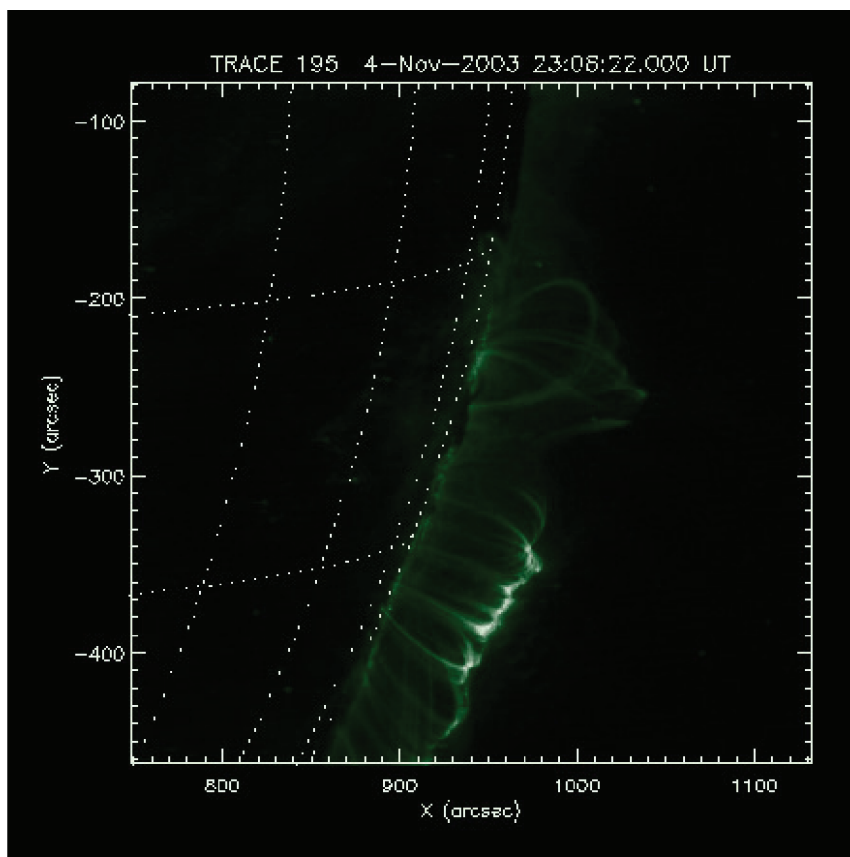


Рис. 1. Пример одного кадра вспышки 4 ноября 2003 г. в канале 195 Å, снятой с космического аппарата TRACE. По осям отложен размер поля зрения телескопа, пунктиром на снимке размечены ячейки $10^\circ \times 10^\circ$ на поверхности Солнца.

аппаратом TRACE (Ханди и др., 1998) в ультрафиолетовом канале 195 \AA (рис. 1). В процессе вспышки TRACE отснял четыре серии снимков, содержащих развитие вспышечной аркады: 21:24:58–22:04:46 UT, 22:31:18–22:44:50 UT, 22:59:31–23:45:01 UT, 00:08:35–00:20:05 UT — всего 178 кадров, из которых нами было составлено 174 разностных изображения размером 512×512 пикселей (рис. 2). Момент начала вспышки, около 20:00 UT, нами не рассматривался. В связи с эффектом насыщения пикселей структура вспышечной аркады в начале вспышки не просматривалась за общим ярким ультрафиолетовым свечением.

Основной причиной выбора для исследования вспышки 4 ноября 2003 г. было удачное расположение аркады магнитных петель в картинной плоскости с видом “в профиль”. По аналогичным причинам для предыдущего исследования была выбрана Бастильская вспышка (Леденцов, 2023). Однако вспышечная аркада Бастильской вспышки располагалась в картинной плоскости анфас, и излучение вершин петель равномерно распределялось вдоль ширины аркады (Оланье и др., 2000; Сомов и др., 2002). На вспышке 4 ноября, напротив, вблизи вершины большая часть петли располагалась вдоль луча зрения и по этой причине имела очень высокую яркость. Эта яркая область помешала автоматическому определению расположения аркады по двумерному Фурье-спектру

мощности возмущений, в соответствии с методом, описанным ранее (Леденцов, 2023).

Двумерный спектр мощности оказался вытянутым вдоль направления, перпендикулярного к вспышечной аркаде (рис. 3), в то время как двумерные спектры мощности возмущений в Бастильской вспышке были вытянуты вдоль аркады. Спектр вытягивается вдоль доминирующего волнового вектора возмущений, присутствующих на разностном изображении, и во вспышке 4 ноября таким возмущением оказалось изменение яркости вершины вспышечной аркады, а не отдельных вспышечных петель. Однако на спектрах вспышки 4 ноября обнаружилась интересная особенность: спектры разбиваются на волокна, расположенные уже вдоль изменяющих яркость петель. Эта особенность позволяет дополнить автоматизацию обработки Фурье-спектра мощности возмущений вспышки 4 ноября. Достаточно повторить процедуру построения двумерного спектра мощности, но не для разностных изображений вспышки, а для их Фурье-спектров (рис. 4). Назовем спектры, изображенные на рис. 3 и 4, первичным и вторичным соответственно. Далее, по аналогии с процедурами, описанными в предыдущей статье, можно произвести поиск направления доминирующего волнового вектора возмущений вспышечной аркады по вторичному Фурье-спектру. Затем, зная это направление, повер-

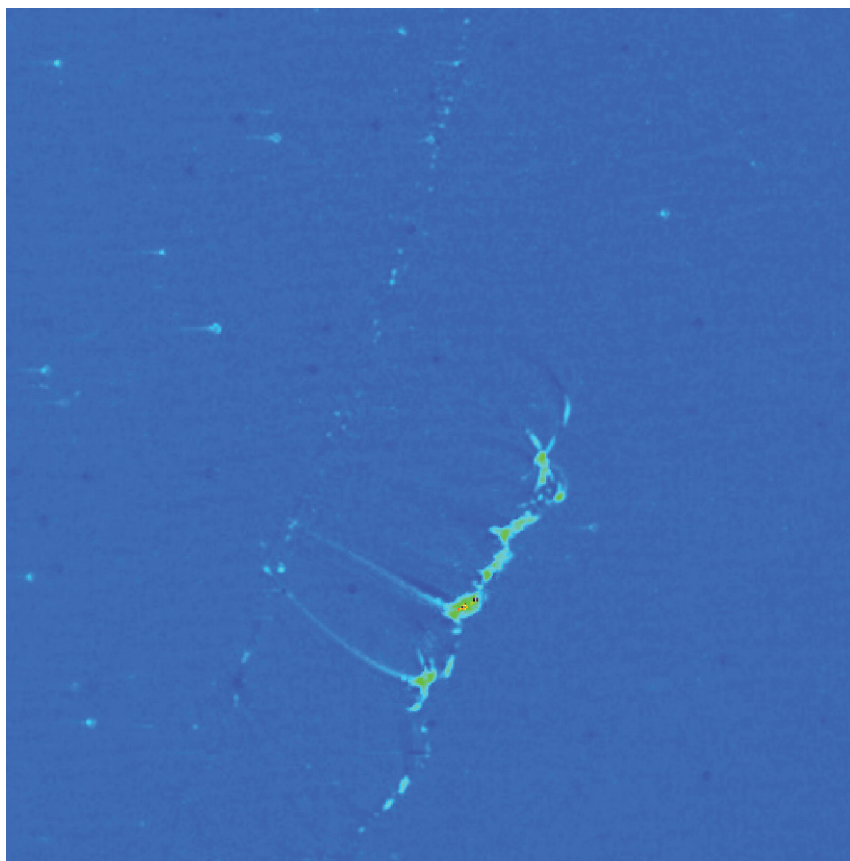


Рис. 2. Пример разностного изображения двух последовательных снимков вспышечной аркады.

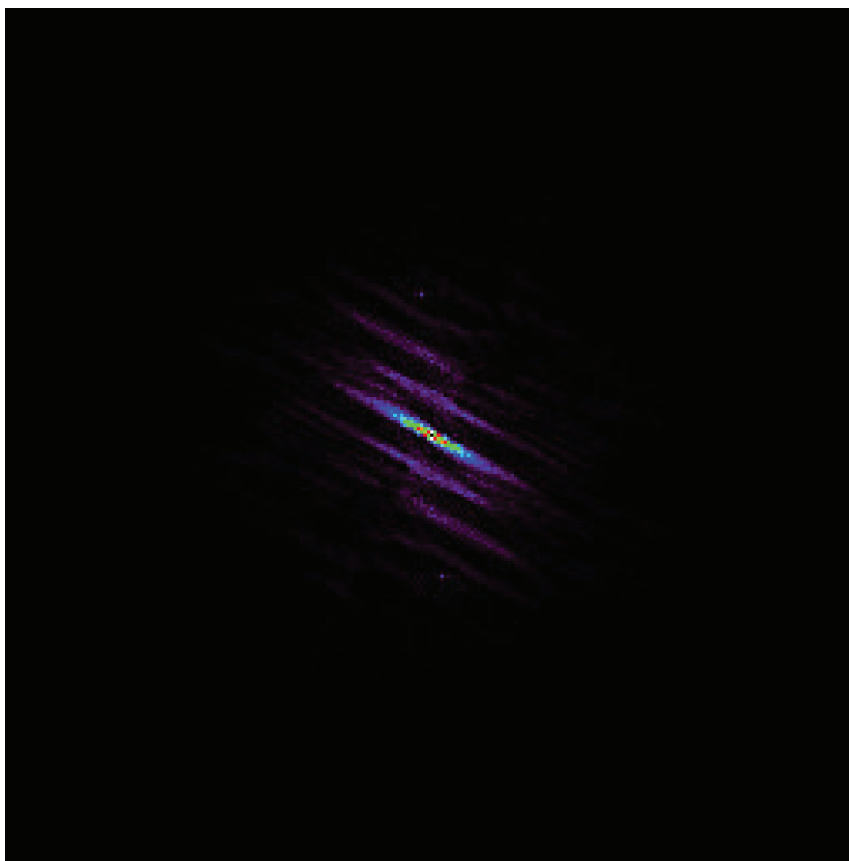


Рис. 3. Пример двумерного Фурье-спектра мощности возмущений разностного изображения, показанного на рис. 2. Представлена увеличенная центральная часть. Цветом показана мощность возмущения, вдоль горизонтали и вертикали откладываются компоненты волновых чисел возмущений. Более подробное описание спектра мощности см. в Леденцов (2023).

нуть первичный спектр на угол наклона волнового вектора к горизонтали и просуммировать его по всем столбцам, чтобы получить одномерный спектр возмущений, распространяющихся вдоль вспышечной аркады (рис. 5).

Пики на одномерном спектре показывают волновые числа доминирующих возмущений вспышечной аркады. На рис. 5 пики расположены вблизи кратных волновых чисел. Похожая картина наблюдается также на некоторых других одномерных спектрах. Кратность волновых чисел может говорить о формировании ряда гармоник распространяющимися возмущениями. Отделим возмущения от фонового тренда. В предыдущей работе мы искали тренд методом аппроксимации экспоненциальной функцией. В этом исследовании, задавшись целью поиска гармоник распространяющегося возмущения, определим тренд при помощи медианного фильтра с окном $\Delta k = 13$. Это значение немного превышает предполагаемое расстояние между гармониками в пространстве волновых чисел. После применения фильтра искомые гармоники и более высокочастотные изменения устраняются из спектра, и остается только медленный тренд. Кроме того, тренд, выделенный медианным фильтром, по сравнению с экспоненциальной

аппроксимацией лежит ближе к исходному Фурье-спектру в области больших волновых чисел k . Это позволит проверить наличие высоких гармоник у распространяющегося возмущения. После нормировки на медленный тренд значимые возмущения можно выделить в соответствии с некоторым количественным критерием относительно среднеквадратичного отклонения σ значений в полученном ряду (рис. 6).

Три первых пика на рис. 6 превышают порог 3σ и находятся на равном расстоянии друг от друга. Проверим стабильность образования подобной структуры. Если просуммировать нормированные спектры всех 174 разностных изображений, стационарные структуры усилятся, а случайные события ослабнут. Вспышка 4 ноября демонстрирует стабильную картину распределения возмущений по спектру (рис. 7). Первые 9 пиков на рис. 7 надежно превышают критерий 1σ и показывают явную периодическую структуру. Вторичный Фурье-спектр мощности суммарного ряда имеет два явных пика, соответствующих периодизации $k_1 = 256/36 \approx 7$ и $k_2 = 256/30 \approx 9$ единиц волнового числа (рис. 8). Периодизация $k_1 = 7$ хорошо прослеживается по положениям главных пиков вплоть до волнового числа $k = 105$, и большинство из этих пиков достигают отклонения в 1σ .

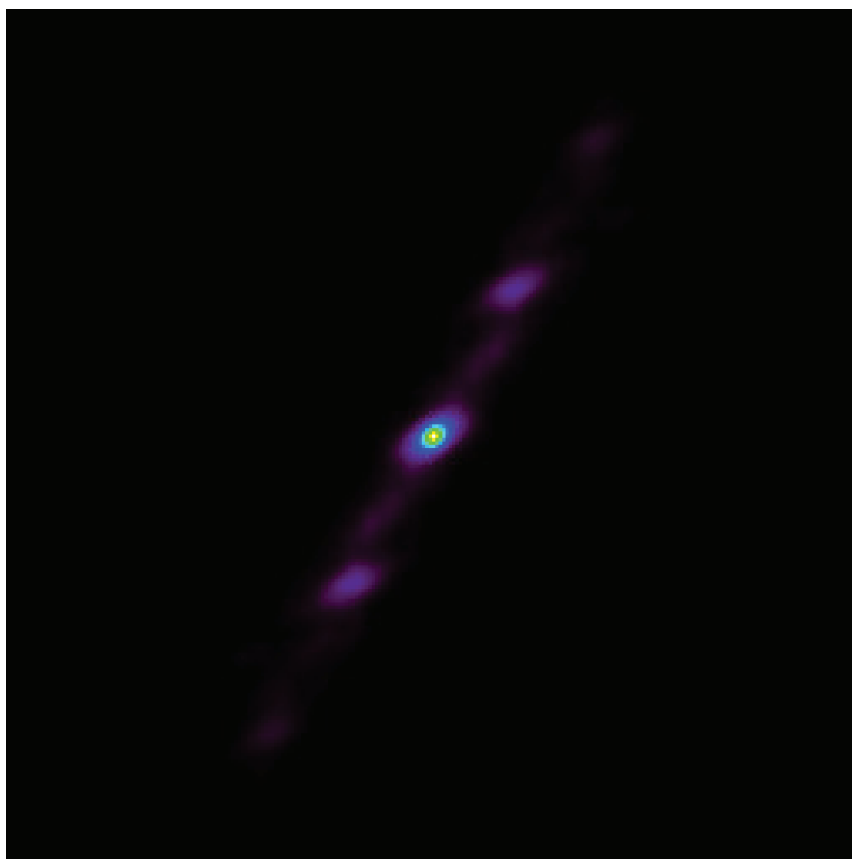


Рис. 4. Пример вторичного двумерного Фурье-спектра мощности, построенного на основе рис. 3. Представлена увеличенная центральная часть.

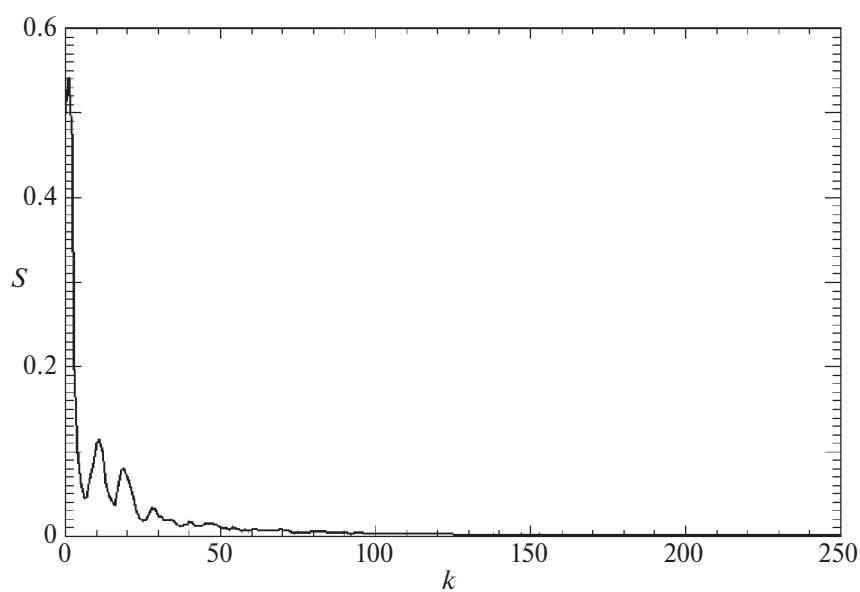


Рис. 5. Пример одномерного спектра мощности возмущений полного кадра, представленного на рис. 2. S — мощность возмущения, k — волновое число.

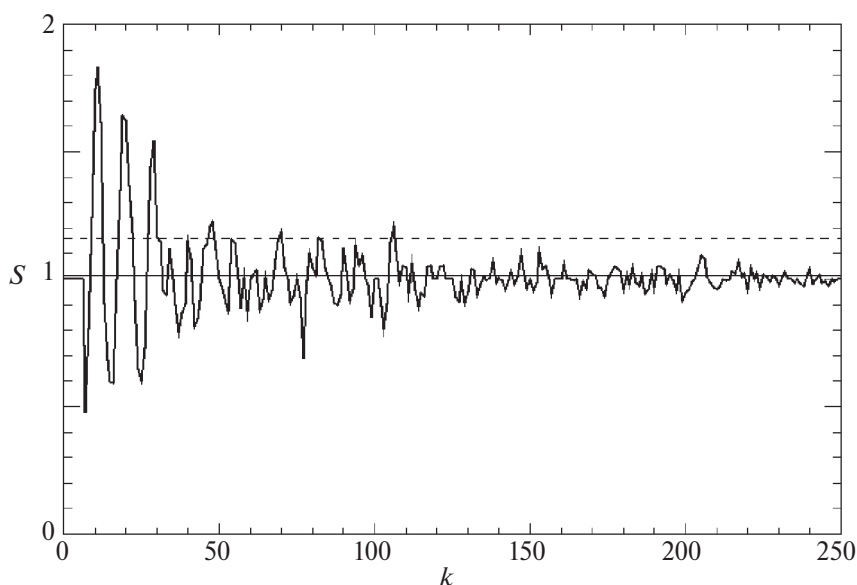


Рис. 6. Пример одномерного спектра мощности (рис. 5), нормированного на медленный тренд. Тонкой сплошной линией нанесено среднее значение мощности, пунктирной — уровень 1σ над средним.

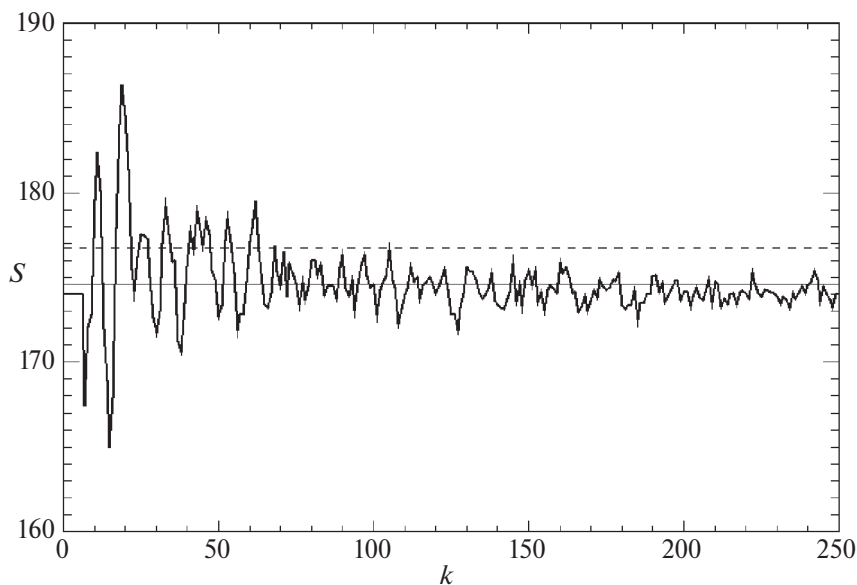


Рис. 7. Сумма всех нормированных одномерных спектров мощности для вспышки 4 ноября 2003 г. Тонкой сплошной линией нанесено среднее значение мощности, пунктирной — уровень 1σ над средним.

Если рассматривать только первые девять высоких пиков на рис. 7, то диапазон пространственных периодов энергосвечения, соответствующих их волновым числам, простирается от $\lambda_1 = 0.4 \times 512/11 \approx 3.3$ Мм до $\lambda_2 = 0.4 \times 512/62 \approx 18.6$ Мм, где коэффициент 0.4 Мм/пиксель соответствует приблизительно разрешающей способности ультрафиолетового телескопа на космическом аппарате TRACE. Если принять во внимание менее явные пики, то нижняя граница пространственных периодов расширится до $\lambda_1 = 0.4 \times 512/105 \approx 2$ Мм. Мы интерпретируем эти результаты как быстрое энергосвечение в результате разрушения пред-

вспышечного токового слоя с пространственной периодизацией, содержащей множество высоких гармоник. Найденные гармоники аналогичным образом выделяются на каждой из четырех отдельно взятых серий изображений, хоть и с меньшей достоверностью по причине меньшей выборки.

Применение описанной процедуры к модельному ряду сгенерированных разностных изображений позволяет надежно установить наличие высоких гармоник в данных. На рис. 9 и 10 представлены примеры одного из 174 сгенерированных изображений и его двумерного Фурье-спектра. Каждое разностное изображение сформировано суммой 32 плоских волн с

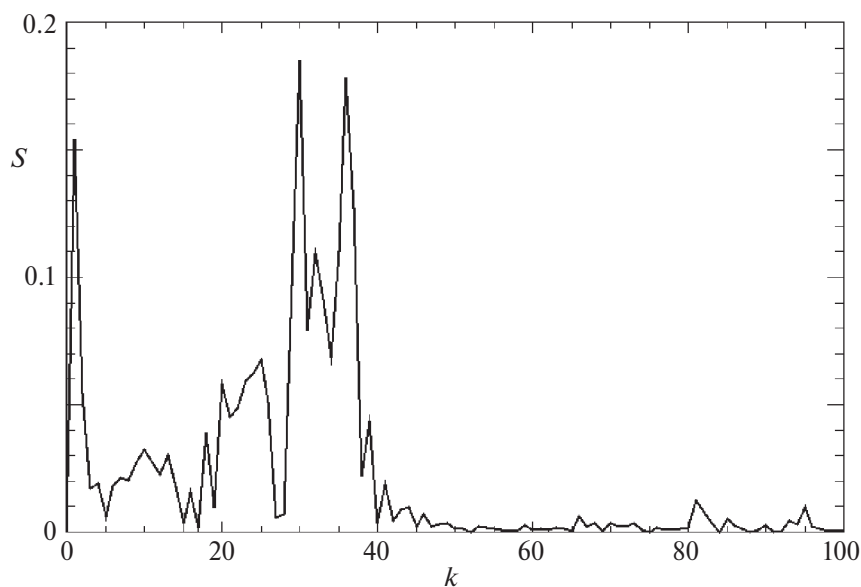


Рис. 8. Вторичный Фурье-спектр мощности суммы, изображенной на рис. 7.

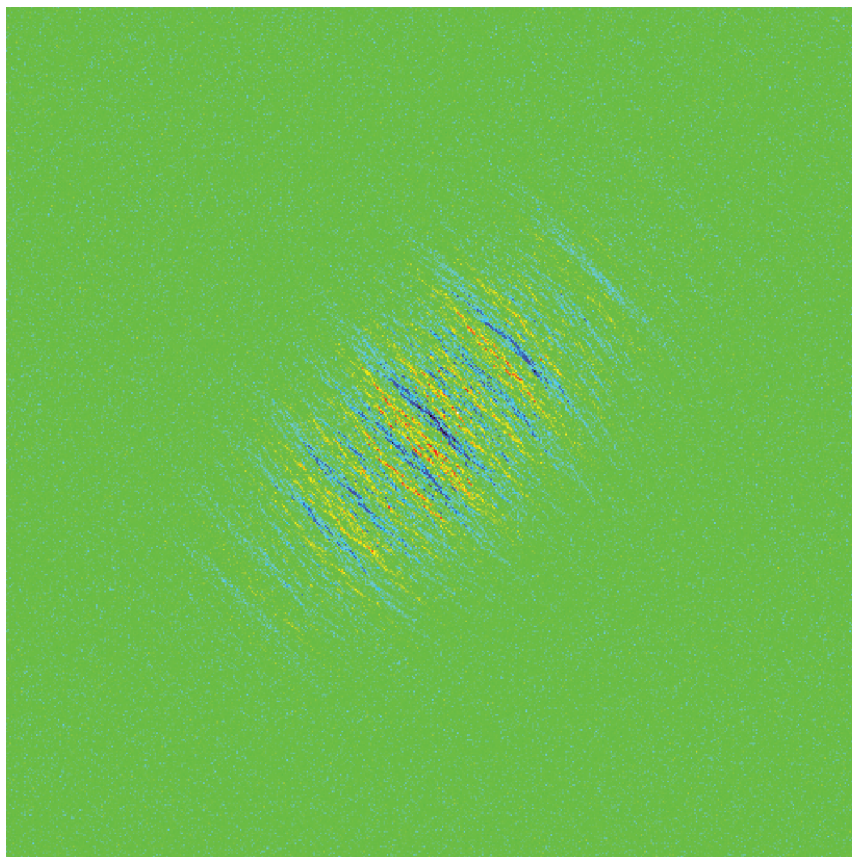


Рис. 9. Пример модельно сгенерированного разностного изображения.

волновым числом основной гармоники $k = 8$. Амплитуды волн ограничены в пространстве гауссовыми кривыми по двум координатам. Всем гармоникам добавлены случайные отклонения в амплитуде, волновом числе, фазе, а также направлении распростра-

нения. Кроме того, на каждое изображение наложен случайный гауссовский шум. Характерный двумерный спектр мощности сгенерированных изображений (рис. 10) отличается от наблюдаемого (рис. 3) отсутствием сильного медленного тренда, наиболее за-

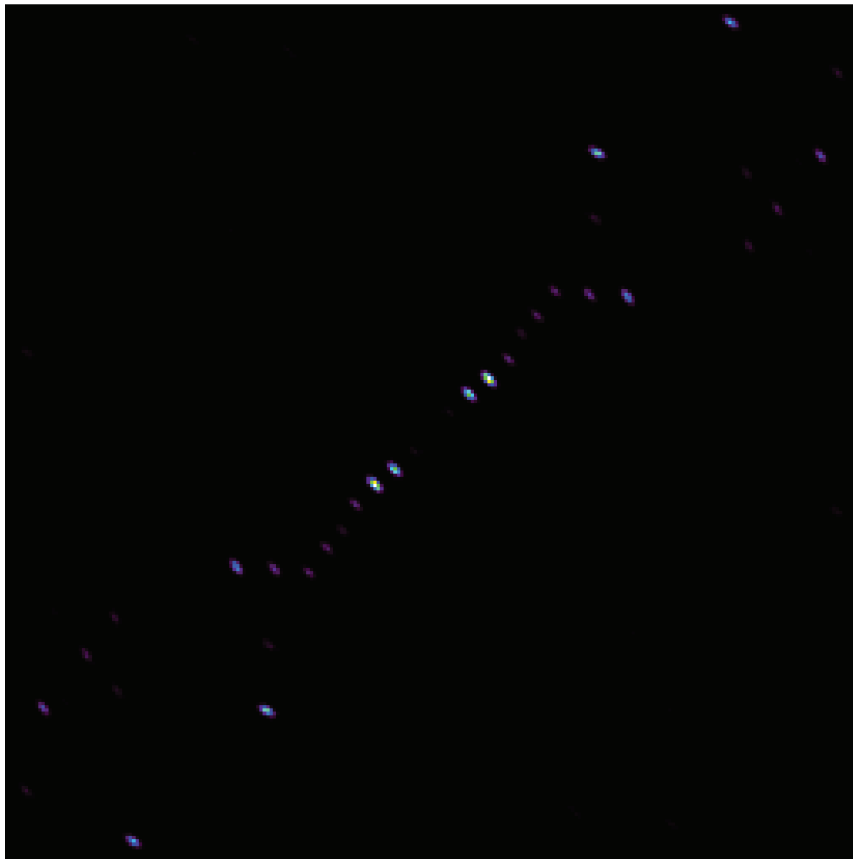


Рис. 10. Пример двумерного Фурье-спектра мощности возмущений разностного изображения, показанного на рис. 9. Представлена увеличенная центральная часть.

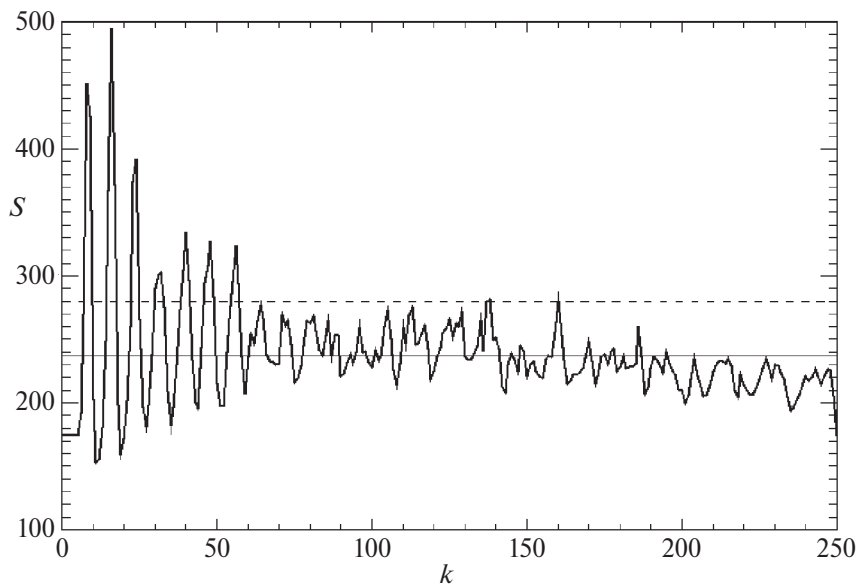


Рис. 11. Сумма всех нормированных одномерных спектров мощности для модельного ряда разностных изображений. Тонкой сплошной линией нанесено среднее значение мощности, пунктирной — уровень 1σ над средним.

метного, как яркая область в центре рис. 3. Непрерывный тренд в основном обусловлен яркими узко локализованными областями на разностных изображении

ях, связанных с вершинами петель для вспышки 4 ноября 2003 г. Подобные узко локализованные структуры в модельные разностные изображения не вноси-

лись. Суммарный одномерный Фурье-спектр мощности 174 сгенерированных изображений (рис. 11) показывает похожую на реальный спектр (рис. 7) структуру. Первые 7 пиков на рис. 11 имеют квазипериодическое распределение вдоль оси волновых чисел и надежно превышают отклонение в 1σ . Вторичный Фурье-спектр мощности суммарного ряда имеет один главный пик, соответствующий заданной периодизации $k = 256/32 \approx 8$ единиц волнового числа (рис. 12).

Для сравнения также применим всю последовательность описанных процедур к ранее рассматривавшейся Бастильской вспышке. Рисунки 13 и 14 де-

монстрируют суммарный нормированный одномерный Фурье-спектр мощности, построенный на основе данных предыдущей работы, и его вторичный Фурье-спектр мощности соответственно. Спектры не показывают ни формирования множества гармоник возмущения, ни наличия какого-либо выделенного пространственного периода энергосвечения. Высокий пик вблизи начала координат на рис. 14 и подобный пик на рис. 8 описывают постепенное изменение среднего значения мощности на рис. 7 и рис. 13 при увеличении волнового числа и соответствуют медленному тренду, оставшемуся после медианной фильтрации и нормировки спектров.

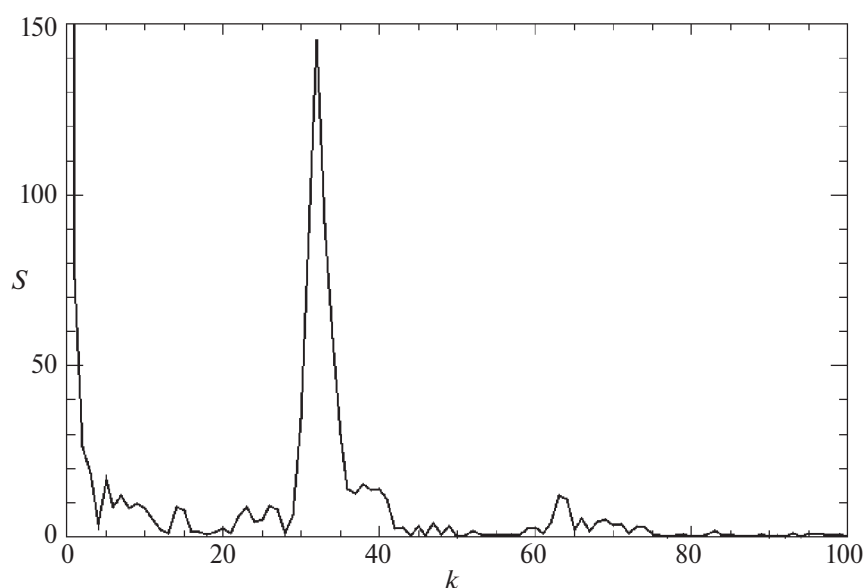


Рис. 12. Вторичный Фурье-спектр мощности суммы, изображенной на рис. 11.

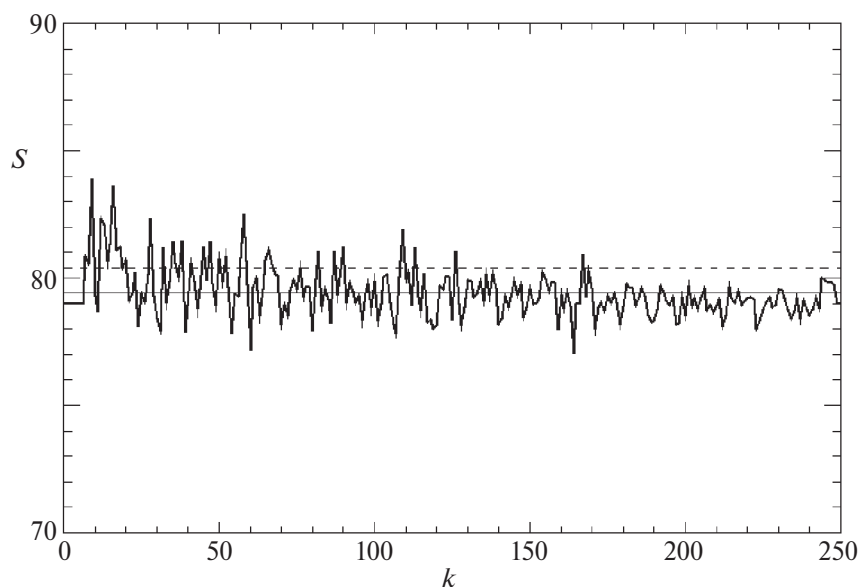


Рис. 13. Сумма всех нормированных одномерных спектров мощности для Бастильской вспышки. Тонкой сплошной линией нанесено среднее значение мощности, пунктирной — уровень 1σ над средним.

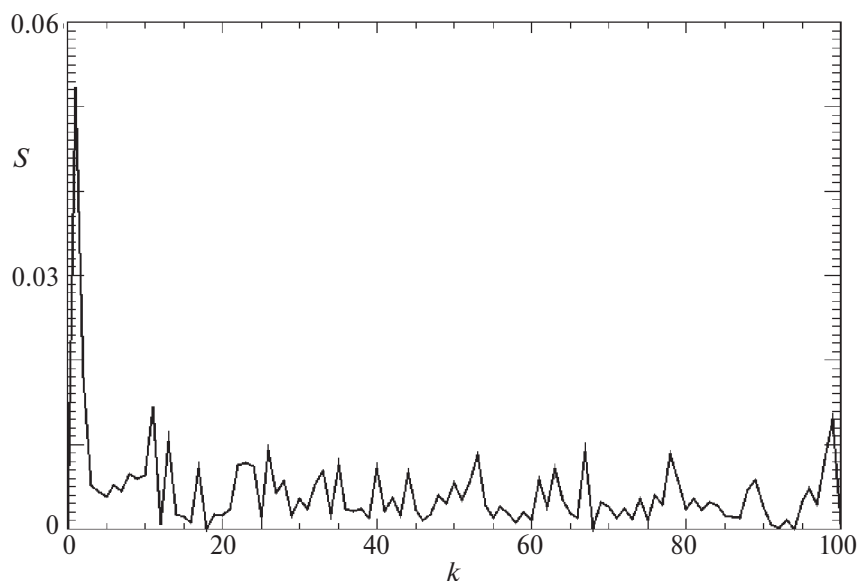


Рис. 14. Вторичный Фурье-спектр мощности суммы, изображенной на рис. 13.

По наблюдениям пары вспышек невозможно установить, насколько распространено найденное формирование гармоник в Фурье-спектре мощности возмущений вспышки 4 ноября, почему оно отсутствует в Бастильской вспышке и, более того, является ли достоверным физическим эффектом, а не проявлением начальной неоднородности параметров магнитного поля и плазмы вдоль нейтральной линии или результатом неучтенных особенностей математической обработки. Ответ на этот вопрос требует дальнейших исследований большого числа вспышек.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами изучено пространственное распределение областей первичного энергосвечения в большой солнечной вспышке, произошедшей 4 ноября 2003 г. Исследование произведено на основе данных ультрафиолетовых наблюдений развития вспышечной аркады и метода, предложенного автором ранее (Леденцов, 2023). Метод заключается в применении быстрого дискретного преобразования Фурье к разностным изображениям вспышечной аркады. Для данного исследования метод был модернизирован на шаге автоматизации поиска направления распространения возмущений в аркаде в связи с особенностями расположения вспышки вблизи лимба Солнца, а также на шаге выделения медленного тренда в одномерном Фурье-спектре мощности бегущих по аркаде возмущений для обнаружения новой особенности в периодизации областей энергосвечения — формировании множественных стабильных пространственных гармоник. Область пространственных периодов, соответствующих найденным гармоникам, занимает диапазон от 3.3 до 18.6 Мм.

Мы полагаем, что пространственные гармоники могут формироваться в процессе распада токового слоя, аккумулирующего энергию коронального магнитного поля перед вспышкой. Для этого токовый слой конечной длины в процессе роста малого возмущения под действием одной из возможных неустойчивостей плазменной, тепловой или иной природы должен испытывать колебания не только на некоторой “собственной” частоте, характерной частоте неустойчивости, но и ее гармониках. Так, например, тепловая неустойчивость может привести предвспышечный токовый слой к распаду с пространственным периодом 1–10 Мм в широком диапазоне корональных параметров плазмы (Леденцов, 2021a, b). Увеличение масштаба неустойчивости до 20 Мм также возможно в случае наклонного распространения возмущения вдоль токового слоя (Леденцов, 2021c). Однако тепловая неустойчивость в линейном приближении не формирует дополнительных пространственных гармоник возмущения. Найденный в нашем исследовании эффект образования пространственных гармоник требует дальнейшего исследования — как количественного, с привлечением новых наблюдательных данных, так и качественного, с позиций теоретической интерпретации результатов.

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. Бродрик и др. (D. Brodrick, S. Tingay, and M. Wieringa), *Solar Phys.* **110**, A09S36 (2005).
4. Ворпал (J.A. Vorpahl), *Astrophys. J.* **205**, 868 (1976).
5. Григис, Бенц (P.C. Grigis and A.O. Benz), *Astrophys. J.* **625**, L143 (2005).
6. 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).
7. Климушкин и др. (D.Y. Klimushkin, V.M. Nakariakov, P.N. Mager, and O.K. Cheremnykh), *Solar Phys.* **292**, 184 (2017).
8. Крукер и др. (S. Krucker, G.J. Hurford, and R.P. Lin), *Astrophys. J.* **595**, L103 (2003).
9. Кэйн и др. (S.R. Kane, J.M. McTiernan, and K. Hurley), *Astron. Astrophys.* **433**, 1133 (2005).
10. Леденцов (L. Ledentsov), *Solar Phys.* **296**, 74 (2021a).
11. Леденцов (L. Ledentsov), *Solar Phys.* **296**, 93 (2021b).
12. Леденцов (L. Ledentsov), *Solar Phys.* **296**, 117 (2021c).
13. Леденцов Л.С., Письма в Астрон. журн. **49**, 819 (2023) [L.S. Ledentsov, *Astron. Lett.* **49**, 744 (2023)].
14. Накаряков и др. (V.M. Nakariakov, C. Foullon, E. Verwichte, and N.P. Young), *Astron. Astrophys.* **452**, 343 (2006).
15. Оланье и др. (G. Aulanier, E.E. DeLuca, S.K. Antiochos, R.A. McMullen, and L. Golub), *Astrophys. J.* **540**, 1126 (2000).
16. Прист, Форбс (E.R. Priest and T.G. Forbes), *Astron. Astrophys. Rev.* **10**, 313 (2002).
17. Рева и др. (A. Reva, S. Shestov, I. Zimovets, S. Bogachev, and S. Kuzin), *Solar Phys.* **290**, 2909 (2015).
18. Сомов (B.V. Somov), *Plasma Astrophysics. Part I. Fundamentals and Practice. Second Edition* (N.Y.: Springer SBM, 2012).
19. Сомов (B.V. Somov), *Plasma Astrophysics. Part II. Reconnection and Flares. Second Edition* (N.Y.: Springer SBM, 2013).
20. Сомов, Вернета (B.V. Somov and A.I. Verneta), *Space Sci. Rev.* **65**, 253 (1993).
21. Сомов и др. (B.V. Somov, T. Kosugi, H.S. Hudson, T. Sakao, and S. Masuda), *Astrophys. J.* **579**, 863 (2002).
22. Сомов Б.В., Сыроватский С.И., Успехи физ. наук **120**, 217 (1976) [B.V. Somov, S.I. Syrovatskii, *Sov. Phys. Usp.* **19**, 813 (1976)].
23. Сомов, Сыроватский (B.V. Somov and S.I. Syrovatskii), *Solar Phys.* **75**, 237 (1982).
24. Сыроватский С.И., Письма в Астрон. журн. **2**, 35 (1976) [S.I. Syrovatskii, *Soviet Astron. Lett.* **2**, 13 (1976)].
25. Ториуми, Ванг (S. Toriumi and H. Wang), *Living Rev. Sol. Phys.* **16**, 3 (2019).
26. Фюрс и др. (H.P. Furth, J. Killeen, and M.N. Rosenbluth), *Phys. of Fluids* **6**, 459 (1963).
27. Филд (G.B. Field), *Astrophys. J.* **142**, 531 (1965).
28. Ханди и др. (B.N. Handy, M.E. Bruner, T.D. Tarbell, A.M. Title, C.J. Wolfson, M.J. Laforge, and J.J. Oliver), *Solar Phys.* **183**, 29 (1998).