

НЕЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЕЛЬ КАК ВОЗМОЖНЫЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ВСПЫШЕК

А.Б. Нечаева¹, И.В. Зимовец¹, И.Н. Шарькин¹, С.А. Анфиногентов²

¹Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия,
nechaeva.workspace@gmail.com

²Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

DECAYLESS OSCILLATIONS OF SOLAR CORONAL LOOPS AS POSSIBLE PRECURSORS OF FLARES

A.B. Nechaeva¹, I.V. Zimovets¹, I.N. Sharykin¹, S.A. Anfinogentov²

¹Space Research Institute RAS, Moscow, Russia, nechaeva.workspace@gmail.com

²Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Аннотация. Солнечная вспышка — это внезапный, быстрый и сильный магнитно-энергетический выброс, характеризующийся усилением яркости излучения в широком спектре, наблюдаемый вблизи солнечных пятен. Изучение солнечных вспышек и их предвестников — важная задача как для понимания самого процесса накопления и выделения энергии во вспышечных областях, так и для прогнозирования вспышек.

В данной работе в качестве одного из возможных предвестников вспышек мы рассматриваем незатухающие колебания солнечных корональных петель, и их связь с потоком мягкого рентгена по данным XRS/GOES и интегральным излучением активных областей в различных каналах ультрафиолета по данным AIA/SDO. В отличие от затухающих изгибных колебаний, возбуждаемых импульсными динамическими процессами, этот тип поперечных колебаний, по всей видимости, не связан с каким-либо внешним импульсным воздействием, таким как вспышка или корональный выброс, и не демонстрирует значительного затухания. Более того, амплитуда этих незатухающих колебаний обычно ниже, чем у затухающих, поэтому для их детектирования нужны дополнительные методы обработки изображений. При этом корональные петли можно рассматривать как прокси линий магнитного поля в активных областях Солнца. Таким образом, незатухающие колебания существуют вне зависимости от динамических триггеров, и изменения в характере их поведения можно рассматривать в контексте предвспышечной активности по перестройке магнитной конфигурации активной области. Мы представляем результаты предварительного анализа незатухающих колебаний петель в нескольких активных областях и их связи с вариациями потока рентгеновского излучения перед вспышками.

Ключевые слова: Солнце, колебания солнечных петель, солнечные вспышки.

Abstract. A solar flare is a sudden, rapid and strong magnetic-energetic release characterised by an increase in the brightness of the broad-spectrum radiation observed near sunspots. The study of solar flares and their precursors is an important task both for understanding the process of energy storage and release in flare regions itself and for flare prediction.

In this work, we consider the decayless oscillations of solar coronal loops as one of the precursors of flares, and their relation to the XRS/GOES flux and the integrated emission of active regions in different UV channels of AIA/SDO. In contrast to damping kink oscillations excited by impulsive dynamical processes, this type of transverse oscillation does not appear to be associated with any external impulsive forcing, such as a flare or coronal mass ejection, and does not show significant damping. Moreover, the amplitude of these decayless oscillations is typically lower than that of the damping kink oscillations, so additional image processing techniques are needed to detect them. Coronal loops can be considered as proxies of magnetic field lines in active regions of the Sun. Thus, decayless oscillations exist independently of the dynamical triggers, and changes in their behaviour can be considered in the context of pre-explosion activity to rearrange the magnetic configuration of the active region. We present the results of a preliminary analysis of decayless loop oscillations in several active regions and their relation to variations in the X-ray flux before flares.

Keywords: Sun, solar loops oscillations, solar flares.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечная вспышка — это внезапный, быстрый и сильный магнитно-энергетический выброс, характеризующийся усилением яркости излучения в широком спектре электромагнитного излучения и наблюдаемый в активных областях (АО) Солнца. Предсказание вспышек — важный этап понимания физических процессов, приводящих к вспышкам. В данной работе используются данные прибора Atmospheric Imaging Assembly (AIA) на борту Solar Dynamics Observatory (SDO) [Lemen et al., 2012], а также данные по потокам мягкого рентгена со всего видимого солнечного полушария XRS Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES). Мы изучили несколько мощных вспышек, произошедших, когда АО наблюдалась на лимбе Солнца.

АНАЛИЗ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для первичного исследования были отобраны 5 мощных вспышек (SOL2024-02-09T12:53 X3.4, SOL2024-02-12T20:35 M2.7, SOL2024-02-16T06:42 X2.5, SOL2024-03-28T20:50 X1.1, SOL2024-03-30T21:01 M9.4), произошедших в феврале-марте 2024 года, для которых в областях их возникновения чётко наблюдались корональные петли вблизи лимба. Также подготовлен более масштабный список из 18 событий для последующего анализа. Основные критерии отбора вспышечных событий:

- 1) расположение АО вблизи лимба (гелиографические долготы выше ~80 градусов);
- 2) хорошая видимость корональных петель в канале 171 Å SDO/AIA в области развития вспышки;
- 3) наличие мощной вспышки (условно выше класса M1) в АО.

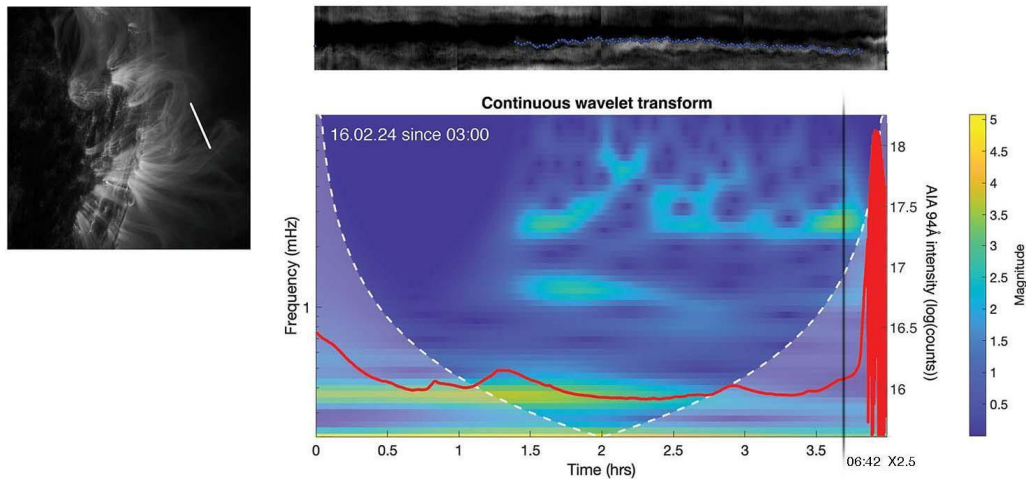


Рис. 1. Пример анализа вспышки SOL2024-02-16T06:42 X2.5. Слева — изображение рассматриваемой АО в канале AIA/SDO 171 Å, где белой линией показан срез, для которого построена диаграмма время-расстояние, показанная на верхней правой панели. На нижней левой панели представлена вейвлет-спектрограмма с нанесенным временным профилем интенсивности в канале 94 Å

Для каждой вспышки были получены данные по ультрафиолетовым изображениям с прибора AIA/SDO в каналах 171 и 94 Å для конкретной АО, в которой произошла вспышка. Для изучения поведения петель до вспышки и их связи с прекурсорами, наблюдаемыми с помощью XRS/GOES, данные проанализированы для отрезка времени от 4 часов до начала основной (мощнейшей) вспышки с временным разрешением в 12 сек. Так как амплитуда незатухающих колебаний сравнительно мала (несколько пикселей для AIA/SDO), для детектирования применялся метод Motion Magnification [Anfinogentov et al., 2019]. Затем для каждого события с помощью библиотеки PyQtGraph были построены диаграммы время-расстояние, показывающие изменение интенсивности УФ излучения вдоль выделенного отрезка во времени. Для одной из вспышек (28.03.2024 X1.1) осцилляций данным методом обнаружить не удалось. Для четырёх оставшихся вспышек на полученных диаграммах время-расстояние вручную были выделены наблюдаемые осцилляции. Так как осцилляции были выделены вручную, и количество точек при ручном выделении ограничено, полученные точки были аппроксимированы сглаживающей кривой. По точкам данных, взятых с этой кривой, был проведён вейвлет-анализ наблюдаемых осцилляций. Далее полученный результат вейвлет-анализа сравнивался с кривой интенсивности излучения из рассматриваемой АО в канале 94 Å. На рис. 1 показаны полученные результаты на примере анализа вспышки SOL2024-02-16T06:42 X2.5. Слева приведено изображение рассматриваемой активной области в канале 171Å. Белой линией показан участок, для которого формировалась карта время-расстояние, показанная слева сверху. Синими маркерами обозначены выделенные вручную точки для отслеживания колебаний. Ниже приведён результат вейвлет-анализа данных колебаний и сравнение его с кривой интегральной интенсивности в канале 94 Å для выбранной АО. Время начала вспышки по данным XRS/GOES показано вертикальной черной линией.

Сравнение вейвлет-спектрограмм для незатухающих осцилляций рассматриваемых корональных петель с временными профилями потока излучения в канале 94 Å и данными XRS GOES, выполненное для пяти проанализированных событий, не выявило очевидных закономерностей. Однако замечено следующее:

- 1) в четырёх событиях перед мощной вспышкой (классов M и X) обнаружено наличие продолжительных (~1 ч и более) незатухающих осцилляций корональных петель с частотами в диапазоне 3–6 мГц (периоды ~2.8–5.6 мин);
- 2) в трех из четырех событий также обнаружены продолжительные (30–40 мин) осцилляции в диапазоне частот 1–2 мГц (периоды ~ 8.3–16.7 мин);
- 3) в двух событиях осцилляции перестают наблюдаться перед официальным началом (за 15–50 мин) основной мощной вспышки, а в двух других событиях осцилляции перестают быть видимыми после начала основной вспышки в окрестности ускорения эрупции и начала импульсной фазы.

Причины этих осцилляций и связь с предвспышечными процессами в АО пока не очевидны. Для дальнейших выводов нужно провести рассмотрение большего числа АО с мощными вспышками и сравнить результаты с АО без мощных вспышек (контрольная выборка), что и планируется на следующий этап проекта.

Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (грант № 20-72-10158)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Anfinogentov S., Nakariakov V., Kosak K. DTCWT based motion magnification v0.5.0 // DOI 10.5281/zenodo.3368773.
- Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J. et al. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // Solar Phys. 2012. V. 275. P. 17–40.