

НЕЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЕЛЬ КАК ВОЗМОЖНЫЕ ПРЕДВЕСТНИКИ МОЩНЫХ ВСПЫШЕК

Нечаева А.Б., Зимовец И.В., Шарыкин И.Н.
Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

DECAYLESS KINK OSCILLATIONS OF SOLAR CORONAL LOOPS AS POSSIBLE PRECURSORS OF POWERFUL FLARES

Nechaeva A.B., Zimovets I.V., Sharykin I.N.
Space research institute of RAS, Moscow, Russia

In this paper we study decayless kink oscillations of solar coronal loops and search for changes in their behaviour prior to powerful (M-, X-class) flares that occurred in active regions where these loops originated. Coronal loops can be considered as proxies of magnetic field lines in active regions of the Sun. We performed preliminary analysis of 11 flare events, in some of which there were oscillatory patterns observed in several loops in a parental active region. For each event, 171 Å and 94 Å AIA/SDO images with a cadence of 12 seconds were downloaded and analysed for time intervals ranging from 4 hours before the flare to 40 minutes after it. As the decayless oscillations are very low-amplitude (1–2 pixels of AIA/SDO), we used the Motion Magnification technique to amplify these oscillations. After retrieving a series of magnified 171 Å images, time-distance maps were constructed and oscillatory patterns were extracted from these maps “by hand”. To check whether there are any changes in the period of oscillations prior to the flare we performed a wavelet analysis. No systematic changes were found. Thus, we preliminary conclude that the kink velocity in coronal loops (with top heights of around 200–300 Mm) is not sensitive enough to local variations of magnetic and plasma parameters in active regions evolving towards powerful flares.

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-233-236>

Введение

Солнечная вспышка – это процесс внезапного, быстрого сброса магнитной энергии, характеризующийся усилением яркости в широком спектре электромагнитного излучения и наблюдаемый в активных областях (АО) Солнца. Краткосрочное и сверхкраткосрочное прогнозирование вспышек является важной прикладной задачей, решение которой необходимо для минимизации их негативных последствий. На сегодняшний день разрабатываются различные методы прогноза вспышек, основанных, в том числе, на наблюдениях предвспышечных колебательных процессов в атмосфере Солнца.

Колебания корональных петель можно описывать как колебания плазменного цилиндра в однородном магнитном поле [1, 2]. Период первой гармоники изгибных (kink) колебаний выражается следующим соотношением:

$$P = 2L/c_k, \quad (1)$$

где L – длина петли, а $c_k = c_{Ai}(2\xi/(\xi + 1))^{1/2}$ – изгибная скорость (здесь ξ – отношение плотностей плазмы вне и внутри петли. Альфвеновская скорость c_{Ai} зависит от магнитного поля и плотности плазмы в петле.

В данной работе в качестве потенциально возможных предвестников вспышек мы рассматриваем незатухающие изгибные колебания корональных петель, которые, в отличие от затухающих, имеют амплитуды порядка 0.2 Мм [3], что сравнимо (или в несколько раз меньше) с размером пикселя прибора the Atmospheric Imaging Assembly (AIA) на борту the Solar Dynamics Observatory (SDO) [4]. По этой причине для анализа этих колебаний, необходимо провести процедуру их усиления по амплитуде. Для этого используется метод Motion Magnification, описанный в [5]. После усиления амплитуда таких колебаний становится уже не 1–2 пикселя AIA/SDO, а 5–10, что значительно упрощает их детектирование и отслеживание.

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. Предвестники – в широком смысле, совокупность явлений в АО перед (~1–2 ч) основной вспышкой. Могут проявляться как относительно слабые короткие (секунды-минуты) всплески интенсивности излучения из локальных участков АО, связанные с динамикой магнитных полей и плазмы. Преимуществом изучения незатухающих колебаний корональных петель в данном контексте является то, что незатухающие колебания корональных петель часто хорошо видны вблизи лимба, где сложно наблюдать солнечные пятна и магнитные поля на фотосфере, необходимые для построения прогноза вспышек.

Данные и методы

Для исследования были отобраны 11 мощных вспышек, для которых в областях их возникновения четко наблюдались корональные петли вблизи лимба. Основные критерии отбора вспышечных событий:

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

Для каждой вспышки были получены данные по ультрафиолетовым изображениям с прибора AIA/SDO в каналах 171 Å ($T \sim 0.6$ МК) и 94 Å ($T \sim 6$ МК) для конкретной АО, в которой произошла вспышка.

Данные проанализированы для интервала времени от 4 часов до начала основной (мощнейшей в интервале) вспышки с временным разрешением в 12 секунд. Для каждого события был применен инструмент Motion Magnification для усиления амплитуды колебаний. Затем для каждого события с помощью библиотеки PyQtGraph были построены диаграммы время-расстояние, показывающие изменение интенсивности УФ излучения вдоль выделенного отрезка во времени. Для всех изучаемых вспышек на полученных диаграммах время-расстояние вручную были выделены наблюдаемые осцилляции. Так как осцилляции были выделены вручную, и количество точек при ручном выделении ограничено, и они не однородно лежат на временной сетке. 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 $94 \text{ \AA}$.

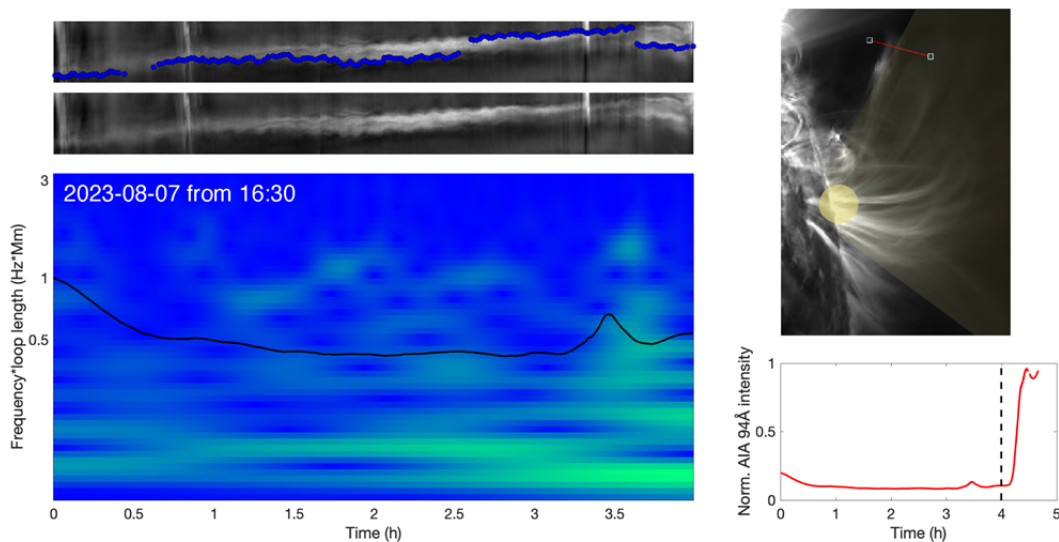


Рисунок.

На рисунке показаны полученные результаты на примере анализа вспышки SOL2023-08-07T20:30 (X1.5 // N12W88). Сверху слева показаны получившиеся диаграммы время-расстояние, в том числе с выделенными вручную колебаниями петли. На верхней панели справа показана исследуемая АО в канале $171 \text{ \AA}$, красным отрезком показан срез, для которого построена диаграмма, желтым кругом показано положение вспышки, и желтым закрашена примерная площадь, которую затрагивает видимое в анализируемых каналах AIA возмущение в результате вспышки. На нижней левой панели представлена вейвлет-спектрограмма колебания за 4 часа до вспышки с нанесенным (черной кривой) временным профилем интенсивности в канале $94 \text{ \AA}$, а на нижней правой – тот же профиль, но дополнительно также для ещё 40 минут после начала вспышки. Время вспышки

обозначено вертикальной пунктирной линией. Стоит обратить внимание, что на спектрограмме показана не частота, а произведение частоты на оценку длины петли, так как эта величина прямо пропорциональна изгибной скорости согласно (1).

Заключение

При рассмотрении эволюции незатухающих колебаний солнечных корональных петель в течение 4 часов до 11 мощных (М- и Х-класса) вспышек не было замечено систематических изменений в их поведении. В отдельных случаях на вейвлет-спектрограммах можно видеть неоднородности в поведении колебаний (например, появление новых частот или усиление уже существующих), но закономерности в появлении этих неоднородностей пока выявлено не было. Поэтому они могут быть как связаны с предвестниками в АО, так и являться артефактами. Этот вопрос требует дальнейшего исследования. В данной работе мы рассматривали изменение параметра частота умноженная на длину волны, то есть изгибной скорости колебаний согласно формуле (1). Таким образом, можно сделать предварительный вывод, что предвспышечная эволюция АО не отражается значительным образом на изгибной скорости в крупных (с высотами ~ 300 Мм) рассмотренных петлях, зависящей от величины магнитного поля в петле, концентрации плазмы и отношения плотностей плазмы внутри и вне петли. В дальнейшем в рамках этого исследования также планируется рассмотреть ещё по крайней мере 10 мощных (выше класса М1) вспышек и провести сравнение с поведением незатухающих колебаний петель в тех АО, в которых не происходило мощных вспышек. Также будет интересно посмотреть, как ведут себя колебания в более низких компактных петлях, располагающихся ближе к вспышечной области, если это позволит сделать разрешение AIA/SDO.

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

Литература

1. *Zajtsev, V.V. and Stepanov, A.V.* On the origin of pulsations of type IV solar radio emission. Plasma cylinder oscillations (I) // *Issledovaniia Geomagnetizmu Aeronomii i Fizike Solntsa*, 1975, **37**, 3–10.
2. *Roberts, B., Edwin, P. M., and Benz, A. O.* On coronal oscillations // *ApJ*, 1984, **279**, 857–865.
3. *Nisticò G., Nakariakov V.M., Verwichte E.* Decaying and decayless transverse oscillations of a coronal loop // *A&A*, 2013, **552** A57.
4. *Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J. et al.* The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Sol Phys.*, 2012, **275**, 17–40.
5. *Anfinogentov, S., Nakariakov V., Kosak K.* DTCWT based motion magnification v0.5.0 // *Zenodo*, 2019.