

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАХВАЧЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ДИАПАЗОНЕ

**Р.Р. Каракотов, А.А. Кузнецов, С.А. Анфиногентов**

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия  
karakrus97@mail.ru

## STUDY OF SLOSHING OSCILLATIONS IN SOLAR FLARES FROM OBSERVATIONS IN ULTRAVIOLET RANGE

**R.R. Karakotov, A.A. Kuznetsov, S.A. Anfinogentov**

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia  
karakrus97@mail.ru

**Аннотация.** Исследуются колебательные процессы в солнечных вспышках по спутниковым наблюдениям. Разработан набор программ для построения и анализа пространственно-временных диаграмм по изображениям, полученным прибором Atmospheric Imaging Assembly (AIA) / Solar Dynamics Observatory (SDO). Проанализированы вспышки класса М за 2013–2014 гг., составлен каталог событий с зафиксированными «плещущимися» (sloshing) колебаниями.

**Ключевые слова:** Солнце, солнечная корона, пространственно-временная диаграмма, sloshing oscillations.

**Abstract.** We study oscillations in solar flares from satellite observations. We developed a set of programs to construct and analyze time-distance diagrams from images obtained onboard the Solar Dynamics Observatory (SDO) with the Atmospheric Imaging Assembly (AIA) instrument. M-class flares were analyzed for the period of 2013–2014, and a catalog of events with recorded “sloshing” oscillations was compiled.

**Keywords:** Sun, solar corona, time-distance diagram, sloshing oscillations.

Исследование солнечной короны дает возможность получить ответы на вопросы, связанные с фундаментальной физикой плазмы, в том числе такие, как магнитное пересоединение, взаимодействие волна—частица, плазменные неустойчивости, ускорение заряженных частиц. Солнечная активность оказывает значительное влияние на космическую погоду и, как следствие, на космические аппараты и станции, снижая их срок эксплуатации и нанося вред электронике. Изучение и прогноз солнечной активности невозможно без наблюдения солнечной атмосферы, для чего используются как наземные телескопы, так и космические обсерватории, ведущие наблюдения в диапазонах длин волн, поглощаемых земной атмосферой.

Плазма солнечной короны — среда, в которой могут существовать различные типы магнитогидродинамических (МГД) волн. Такие волны создают возмущение макропараметров плазмы, например температуры, плотности, величины магнитного поля. Наблюдаемые в короне волны и колебания важны, поскольку по ним, опираясь на теорию корональной гелиосейсмологии, можно проводить не прямой анализ солнечной атмосферы, определяя температуру плазмы и величину магнитного поля.

Одно из проявлений медленных волн в корональных петлях называют плещущимися (sloshing) колебаниями. Они представляют из себя возмущения, перемещающиеся вдоль петли. При наблюдении SDO/AIA эти колебания проявляются как области повышенной яркости в ультрафиолетовом диапазоне, перемещающиеся вперед и назад по петле, отражаясь от ее оснований. Рассматриваются эти колебания, например, в работе [Kumar et al., 2013].

Данные, используемые в работе, получены прибором AIA, установленным на SDO. Он позволяет проводить одновременные наблюдения всего солнечного диска и области  $0.5R_{\text{sun}}$  над уровнем лимба в нескольких линиях ультрафиолетового (УФ) и крайнего ультрафиолетового (КУФ) диапазонов с высоким

пространственным ( $1.5''$ ) и временным (до 12 с) разрешением. Наблюдения при помощи AIA позволяют регистрировать излучение плазмы в диапазоне температур 0.06–20 МК. Наблюдения включают 4200 мм двухканальных телескопа с полем зрения  $41'$ , 10 УФ- и КУФ-фильтров, приемные ПЗС-матрицы  $4096 \times 4096$  пикселей с разрешением  $0.6''$  на пиксель [Lemen, 2012].

Колебания и волны в корональной петле можно исследовать при помощи пространственно-временного распределения яркости по времени и пространственной координате, построенного вдоль виртуальной щели. Для исследования изгибных (кинк) колебаний виртуальная щель располагается поперек петли, а для изучения продольных волновых движений — вдоль нее.

Исследование солнечной короны проводилось на длинах волн 131, 171, 335 Å. Проанализировано 313 вспышек М-класса, зафиксированных с 01.01.2013 по 31.12.2014 (максимум 24-го солнечного цикла). В результате в 10 вспышках были идентифицированы 15 эпизодов колебаний типа sloshing (таблица), наблюдавшихся в канале 131 Å.

Для каждого события при помощи построенных пространственно-временных диаграмм были определены периоды зафиксированных колебаний. Длина петли определялась по координатам ее оснований с использованием следующего приближения: петля имеет форму полуокружности и ее основания лежат на концах ее диаметра. Таким образом, мы получили скорость движения возмущения для каждого события. Температуру плазмы определяем из предположения, что возмущение в петле перемещается со скоростью, в условиях солнечной короны равной скорости звука  $c_s$  [Nakariakov, Verwichte, 2005]

$$c_s = \sqrt{\frac{\gamma k_b T}{\hat{\mu}_p m_p}}, \quad (1)$$

Значения параметров корональных петель и sloshing колебаний в них

№	Время пика вспышки	Класс вспышки	Длина петли в приближении полуокружности, Мм	Период колебаний, с	Скорость движения возмущения, км/с	Температура плазмы, МК
1	2013-10-22T00:22:00	M1.0	75.7	252	600	15.74
2				312	485	10.27
3				360	420	7.21
4				372	406	7.22
5	2013-10-25T20:58:00	M1.9	265	600	884	34.1
6	2013-11-15T02:29:00	M1.0	323	600	1078	50.7
7	2013-11-23T02:32:00	M1.1	339	500	1356	80.19
8				500	1356	80.19
9	2014-02-02T06:34:00	M2.6	165	300	1100	52.93
10	2014-02-02T09:31:00	M4.4	173	400	866	32.72
11	2014-02-14T16:39:00	M1.0	236	800	592	15.29
12				800	592	15.29
13	2014-06-12T18:13:00	M1.3	131	500	524	11.9
14	2014-12-13T05:20:00	M1.5	340	730	930	37.87
15	2014-12-14T19:33:00	M1.6	513	1550	662	19.1

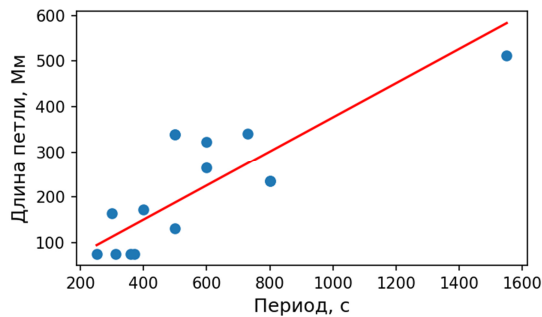


Рис. 1. Зависимость длины корональной петли от периода плещущихся колебаний, которые в ней наблюдались. Красным обозначен линейный тренд

где  $\gamma=5/3$  — показатель адиабаты;  $k_b$  — постоянная Больцмана;  $T$  — температура плазмы;  $\bar{\mu}_p = 0.6$  — средняя молярная масса частицы в солнечной короне;  $m_p$  — масса протона.

Параметры событий даны в таблице. На основании проведенных исследований, мы построили зависимость длины петли от периода колебаний в ней (рис. 1). Аппроксимация методом наименьших квадратов данной зависимости линейной функцией соответствует средней скорости волны  $L/T=376\pm 32$  км/с, что, в свою очередь, позволяет определить среднюю температуру по формуле (1)  $6.177\pm 1.002$  МК. Полученные значения соответствуют типичным значениям скоростей и температур в солнечной короне.

Во время вспышки 2014-02-02T09:31:00 были зафиксированы движущиеся структуры в других длинах волн. Область повышения яркости наблюдалась на длине волны 131 Å, перемещаясь между основаниями петель, в то время как на 171 и 335 Å яркая область поднималась вдоль петли на некоторое расстояние от основания, впоследствии опускаясь обратно. Скорости движений структур составили 187.5 км/с (по данным на канале 171 Å) и 172 км/с

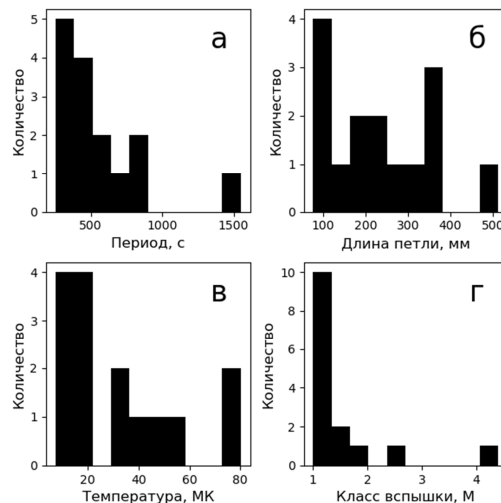


Рис. 2. Гистограмма распределения событий с sloshing-колебаниями по периоду (а), по длине петли (б), по полученной температуре плазмы (в), по классу вспышки (г)

(335 Å). Эрупция волокна наблюдалась во время вспышки 2014-02-02T06:34:00 на всех используемых для исследования каналах.

В двух случаях (2014-02-02T09:31:00 и 2014-06-12T18:13:00) захваченные колебания имели три и более периода на пространственно-временной диаграмме. Это говорит о том, что характерное время затухания в таких событиях существенно больше, чем период колебаний.

На рис. 2 показана гистограмма распределения колебаний по периодам (а). Видно, что захваченные колебания с меньшими периодами наблюдаются чаще, чем колебания с большими периодами.

При этом распределение по длинам петель (б) не показывает определенного тренда — вероятность возникновения колебаний в петлях с разной длиной можно считать более-менее постоянной.

Распределение событий по температуре плазмы ( $\epsilon$ ) показывает падение встречаемости с ростом температуры. Вспышки с большей температурой происходят реже, чем вспышки с меньшей температурой [Lippiello et al., 2010], поэтому количество событий с колебаниями в более горячих вспышках меньше; аналогичная зависимость еще более сильно выражена в распределении событий с колебаниями по классу вспышки ( $\epsilon$ ).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 21-12-00195.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Kumar et al. Solar Dynamics Observatory/Atmospheric Imaging Assembly observations of a reflecting longitudinal wave in a coronal loop. *Astrophys. J. Lett.* 2013. Vol. 779, iss. 1. P. L7. DOI: [10.1088/2041-8205/779/1/L7](https://doi.org/10.1088/2041-8205/779/1/L7).
- Lemen J.R. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.* 2012. Vol. 275. P. 17–40.
- Lippiello E., de Arcangelis L., Godano C. Time-energy correlations in solar flare occurrence. *Astron. Astrophys.* 2010. Vol. 511.
- Nakariakov V.M., Verwichte E. Coronal waves and oscillations. *Living Rev. in Solar Phys.* 2005. Vol. 2.
- Nakariakov et al. Kink oscillations of coronal loops. *Space Sci. Rev.* 2021. Vol. 217.
- Pascoe et al. Coronal loop seismology using standing kink oscillations with a lookup table. *Frontiers in Astronomy and Space Sci.* 2019. Vol. 6.