

УДК 523.9

## Анализ и методика обработки спектров пульсаций радио-, оптического и рентгеновского излучений солнечной вспышки 2015 года

Ю.А. Купряков<sup>1,2</sup>, А.Б. Горшков<sup>2</sup>, Л.К. Кашианова<sup>3</sup>, М. Bárta<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Astronomical Institute AS CR, Fričova 298, 251 65 Ondřejov, Czech Republic  
*kupry@asu.cas.cz*

<sup>2</sup> Астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова, Университетский пр., 13, Москва, 119234, Россия  
*gorshkov@sai.msu.ru*

<sup>3</sup> Институт солнечно-земной физики, СО РАН, Иркутск, 664033, Россия  
*lkk@iszf.irk.ru*

Поступила в редакцию 21 сентября 2022 г.

**Аннотация.** Работа посвящена поиску квазипериодических колебаний солнечных вспышек на основе наблюдений в хромосферных линиях H CaII, H $\beta$ , H $\alpha$ , IR CaII 8542 Å (спектрограф HSFA-2, Ondřejov), образующихся под воздействием множества параметров: температуры, плотности, движения вещества, меняющихся в широких диапазонах. После обработки спектров и спектрогелиограмм, включая данные RHESSI и RT-3 в рентгеновском и радиодиапазоне (3 ГГц) соответственно, выявлены близкие между собой периоды колебаний с характерными значениями 1–2 мин. В радио- и рентгеновском излучении также обнаружены предположительно 5-минутные колебания.

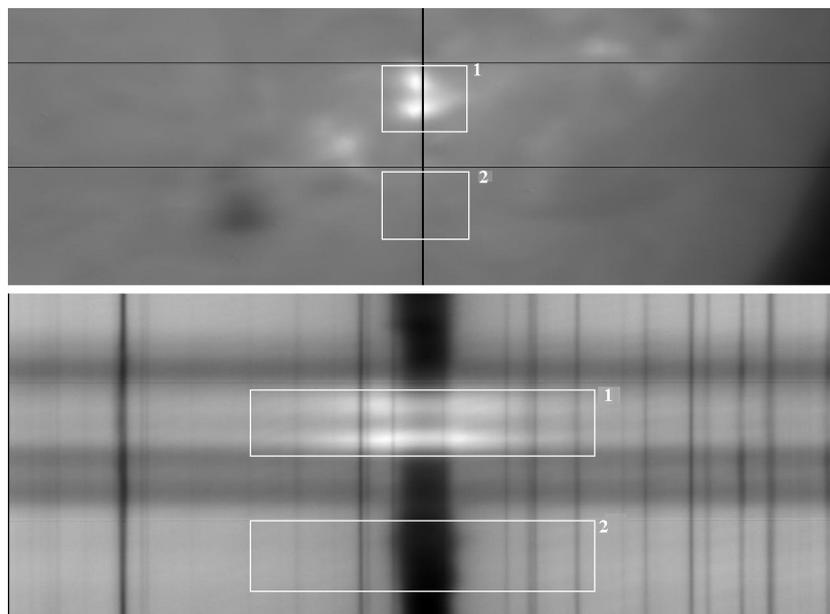
**Ключевые слова:** спектрограф, солнечные вспышки, квазипериодические осцилляции, хромосферное излучение

## 1 Введение

В солнечных вспышках наблюдаются повторяющиеся вариации потоков излучения, например изменяющиеся по гармоническому закону. Однако при наблюдениях невозможно встретить в точности гармонические сигналы. На практике мы имеем дело с отклонениями от гармонического сигнала. Это различные виды трендов и шумы различной природы. Все эти отклонения делают наблюдаемый сигнал квазипериодическим. Квазипериодические пульсации (КПП) вспышечного излучения являются эффективным инструментом диагностики как самих вспышечных процессов, так и параметров тепловой плазмы и ускоренных частиц. В настоящее время существует два основных класса механизмов генерации КПП в излучении. Первый связывает наблюдаемые пульсации с прямым воздействием магнитогидродинамических (МГД) волн, а второй – с повторяющимся процессом магнитного пересоединения (см. [Kupriyanova et al., 2019, 2020](#)). Часто механизмы двух классов сосуществуют и дополняют друг друга. Задача состояла в поиске и определении колебаний в оптическом, радио- и рентгеновском диапазонах. В оптическом диапазоне – это пионерская работа. В работе нами использована методика, предложенная в [Vaughan \(2005\)](#) и развитая в статьях [Pugh et al. \(2017\)](#) и [Kupriyanova et al. \(2019\)](#).

## 2 Наблюдения и обработка

Для анализа мы выбрали вспышку 1 октября 2015 года класса M 4.5, наблюдения которой были получены на обсерватории Чешской академии наук (Ondřejov), спектрограф Horizontal-Sonnen-Forschungs-Anlage (HSFA-2, 500 mm/35 m). Также были использованы временные профили в рентгеновском диапазоне 6–12 кэВ, полученные на Ramaty High Energy Solar Spectroscopy Imager (RHESSI)



**Рис. 1.** Фильтрограмма в линии  $H_{\alpha}$  SJ (изображение на щели) и спектр в линии  $H_{\alpha}$ . Размер изображений на приведенных снимках соответствует  $1280 \times 512$  пикселей. Показаны области определения интегральной интенсивности на фильтрограмме и спектре в активной (1) и спокойной (2) областях хромосферы. Размер этих областей определялся исходя из разрешения оптики телескопа и спектрографа

(Lin et al., 2002), и наблюдения в микроволновом диапазоне, полученные на Radio Telescope RT3 (Ondřejov Observatory) (Karlický, Jiříčka, 2003) на частоте 3.0 ГГц. Пример полученных спектров и фильтрограмм представлен на рис. 1. Данные записывались с интервалом 4 сек. После калибровки снимков мы определяли интегральную интенсивность в выбранной области для активной и спокойной области хромосферы.

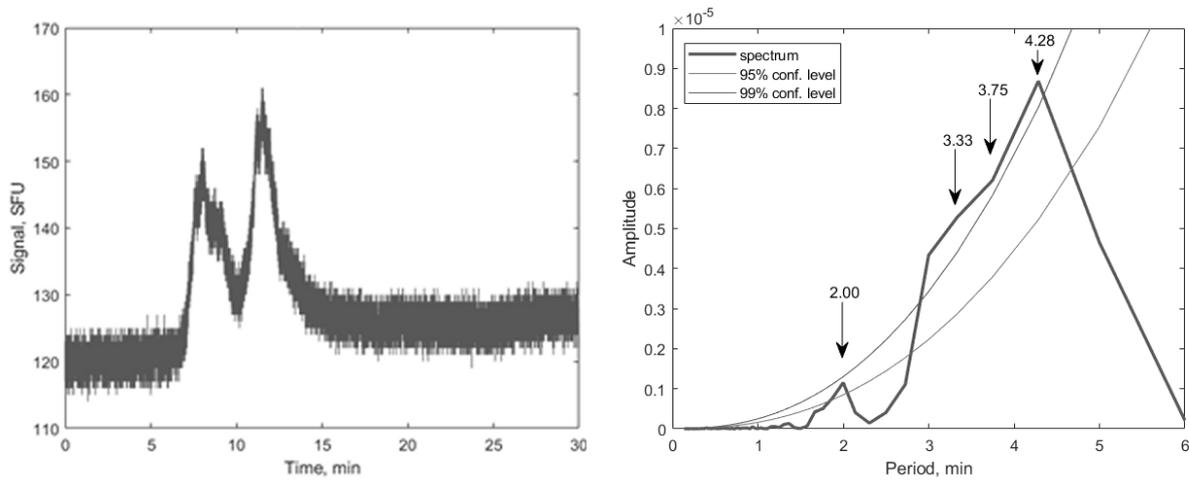
## 2.1 Выявление частот пульсаций в солнечных вспышках

Проблема поиска пульсаций в излучении вспышек состоит в выделении значимых периодов на фоне красного шума. Базовая методика изложена в работе Vaughan (2005), а ее применение к солнечным вспышкам – в работах Pugh et al. (2017) и Kupriyanova et al. (2019). Красный шум характерен тем, что его спектральная мощность падает с частотой по степенному закону. В этом его отличие от белого шума, спектральная мощность которого от частоты не зависит. Опишем кратко алгоритм поиска значимых периодов в излучении солнечных вспышек на примере радиопотока на 3.0 ГГц от вспышки 1 октября 2015 года.

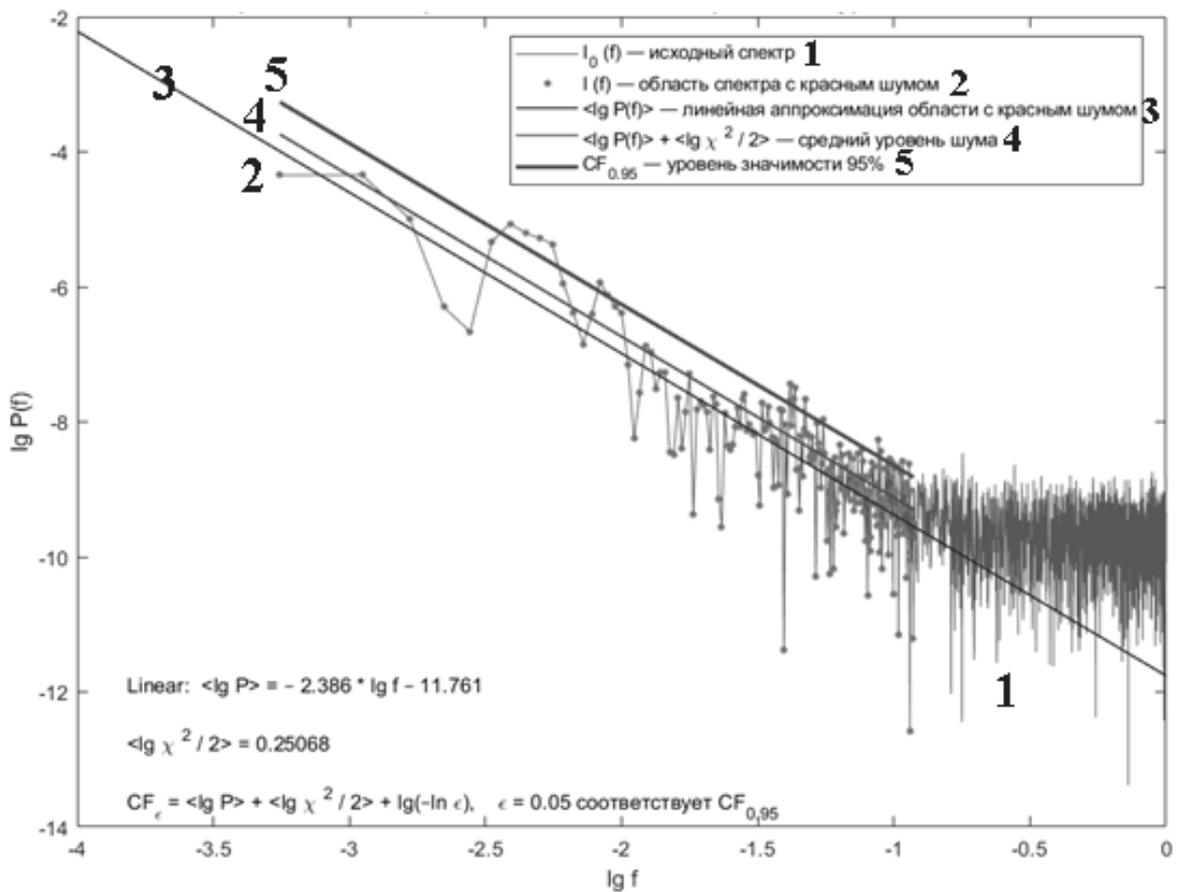
Изначально имеем сигнал как функцию времени (рис. 2, левый график). Далее смотрим график на рис. 3. На нем представлен алгоритм поиска значимых периодов в излучении солнечных вспышек.

Последовательность действий:

1. Рассчитываем спектральную мощность сигнала с помощью быстрого преобразования Фурье и откладываем ее логарифм как функцию логарифма частоты (линия 1). Видим зашумленный спектр, мощность которого сначала линейно падает (область красного шума), а затем становится постоянной (область белого шума).
2. Выделяем в спектре уровень красного шума (точки 2 на линии 1), отбрасываем точку с минимальной частотой (частота Найквиста).
3. Полученный участок спектра аппроксимируем прямой (линия 3).
4. Добавляем средний уровень шума (линия 4) – это константа, а возможность использования операции сложения определяется тем, что мы работаем в двойной логарифмической шкале.



**Рис. 2.** Данные с RT3 (слева). Сигнал SFU (солнечные единицы потока) 01-10-2015 на частоте 3.0 ГГц. Спектр мощности для RT3 (правый график). Сигнал, приведенный на графике слева, показывает, что вспышка имела два максимума. Для поиска периодичности мы использовали сигнал на момент вспышки



**Рис. 3.** Пример алгоритма поиска значимых периодов в радиоизлучении солнечных вспышек. Для анализа мы выбрали из точек, расположенных на прямой 5, самые значимые

5. На завершающем этапе анализа рассчитываем уровень спектральной мощности, выше которого шум может оказаться только с малой вероятностью  $\epsilon$ . Это так называемый уровень значимости спектральных пиков (линия 5). Если  $\epsilon$  выбран 0.05, то мы говорим, что пики спектра, лежащие выше этого уровня, имеют уровень значимости выше 95 %.

**Таблица 1.** Значения периодов колебаний в минутах для спектральных линий, SJ и RHESSI

H CaII	H $\beta$	H $\alpha$	IR CaII	SJ	RHESSI	RT3
1.31	1.13	1.31	2.33	1.23	0.66	2.00
1.50	1.31	2.09	3.49	1.82	0.75	3.33
1.90			5.23	3.49	1.41	3.75
						4.28

Итоговый спектр представлен на правом графике рис. 2. На графике представлена амплитуда мощности колебаний в зависимости от периода для обработанного интервала наблюдений 13:03–13:14 UT (обозначены уровни значимости 95 % и 99 %). В спектре хорошо заметны несколько характерных максимумов с периодами колебаний 2.0, 3.33, 3.75 и 4.28 минут. Подобную операцию мы проделали для фильтрограммы в линии H $\alpha$  и для спектральных линий H CaII, H $\beta$ , H $\alpha$ , IR CaII и данных с RHESSI (таблица 1).

### 3 Выводы

После обработки спектров в линиях (H CaII, H $\beta$ , H $\alpha$ , IR CaII) и спектрогелиограмм (SJ), а также данных RHESSI и RT3 были получены близкие значения периодов колебаний в диапазоне 1–2 мин с учетом уровня значимости. Возможно, разброс значений связан с тем, что излучение в разных спектральных диапазонах приходит с разных уровней хромосферы. Предположительно, обнаруженные 5-минутные колебания по радиопотоку 3 ГГц имеют ту же природу, что и в работе [Челпанов и др. \(2020\)](#), т. е. вспышка явилась модулятором уже существующих в хромосфере колебаний. Безусловно, красный шум может иметь и инструментальную природу. Поэтому мы использовали наблюдения, полученные на разных инструментах, и кроме того, сравнили значения периодов колебаний с данными, приведенными в работах [Kupriyanova et al. \(2019, 2020\)](#). Результаты можно использовать для изучения распространения МГД-волн в солнечных вспышках согласно методике из работы [Челпанов и др. \(2020\)](#).

**Благодарности.** Авторы благодарят коллективы RHESSI, SDO и Ondřejov Observatory за предоставленную возможность проведения наблюдений и использования данных.

### Литература

- Челпанов А.А., Кобанов Н.И., 2020. *Астрон. журн.* Т. 97. № 4. С. 341. [Chelpanov A.A., Kobanov N.I., 2020. *Astron. zhurn.*, vol. 97, no. 4, p. 341. (In Russ.)]
- Karlický M., Jiříčka K., 2003. In A. Wilson (Ed), *Solar variability as an input to the Earth's environment, International Solar Cycle Studies (ISCS) Symposium*. Noordwijk: ESA Publications Division, pp. 499–502.
- Kupriyanova E.G., Kashapova L.K., Doorselaere T.V., et. al., 2019. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 483, pp. 5499–5507.
- Kupriyanova E., Kolotkov D., Nakariakov V., and Kaufman A., 2020. *Solar-Terrestrial Physics*, vol. 6, pp. 3–23.
- Lin R.P., Dennis B.R., Hurford G.J., et al., 2002. *Solar Phys.*, vol. 210, pp. 3–32.
- Pugh C.E., Broomhall A.M., Nakariakov V.M., 2017. *Astron. Astrophys.*, vol. 602, p. A47.
- Vaughan S., 2005. *Astron. Astrophys.*, vol. 431, pp. 391–403.

## Analysis and processing technique for the spectra of pulsations of radio, optical and X-ray radiation of the 2015 solar flare

*Yu. Kupryakov*<sup>1,2</sup>, *A. Gorshkov*<sup>2</sup>, *L. Kashapova*<sup>3</sup>, *M. Bárta*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Astronomical Institute ASCR, Fričova 298, Ondřejov 251 65, Czech Republic  
*kupry@asu.cas.cz*

<sup>2</sup> Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Universitetsky pr. 13, Moscow 119234, Russia  
*gorshkov@sai.msu.ru*

<sup>3</sup> Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk 6640333, Russia  
*lkk@iszf.irk.ru*

**Abstract.** The work is devoted to the search for quasi-periodic fluctuations in the radiation of solar flares based on observations in the H CaII, H $\beta$ , H $\alpha$ , IR CaII 8542 Å chromospheric lines (spectrograph HSFA-2, Ondřejov), which are formed under the influence of many parameters such as temperature, density, motions of matter that change in wide ranges. After processing the spectra and spectroheliograms, including the RHESSI and RT-3 data in the X-ray and radio bands (3 GHz), respectively, oscillation periods close to each other with characteristic values of 1–2 min were revealed. Presumably 5-minute fluctuations have also been found in radio and X-ray emissions.

**Key words:** pulsations, quasi-periodic pulsations, MHD waves, RHESSI, RT3