

МНОВОВОЛНОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ПУЛЬСАЦИЙ ИМПУЛЬСНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ C2.8

**Койнаш Г.В.¹, Зимовец И.В.¹, Шарыкин И.Н.¹,
Иванов Е.Ф.², Киселев В.И.², Низамов Б.А.³**

¹Институт Космических Исследований РАН, Москва, Россия

²Институт Солнечно-Земной Физики СО РАН, Иркутск, Россия

³Государственный Астрономический Институт им. П.К. Штернберга МГУ,
Москва, Россия

MULTI-WAVELENGTH OBSERVATIONS OF QUASI-PERIODIC PULSATIONS IN AN IMPULSIVE C2.8 CLASS SOLAR FLARE

**Koynash G.V.¹, Zimovets I.V.¹, Sharykin I.N.¹,
Ivanov E.F.², Kiselev V.I.², Nizamov B.A.³**

¹Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

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

³Sternberg Astronomical Institute Moscow University, Moscow, Russia

Quasi-periodic pulsations (QPP) are observed in many solar flares across the spectrum from radio waves to gamma radiation [1]. QPP are a characteristic feature of the energy release process in solar flares in the solar atmosphere. QPP can be described by one of the many proposed physical models [2, 3]. To obtain further clarity, a more thorough multiparameter analysis of multi-wavelength observations is needed. In this work, we present the results of a preliminary analysis of multi-wavelength observations of the impulsive C2.8 solar flare that occurred in NOAA 13256 on 19 March 2023, and briefly discuss possible mechanisms of the detected QPP.

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-169-172>

Импульсная солнечная вспышка класса C2.8, наблюдаемая 19 марта 2023 года с 02:12 до 02:19 UT в южном полушарии восточной части диска Солнца (S23E58) в полутени активной области (АО) NOAA 13256 (β /Eho), несмотря на малый класс и, казалось бы, простую конфигурацию пятен в АО, обладала "комплексностью" временной и пространственной структуры, характерной для солнечных вспышек более высоких классов. Событие зарегистрировано обширным числом обсерваторий. В исследовании использованы данные многоволнового наблюдения в широком диапазоне частот – от микроволнового (МВ) излучения, данные радиоастрономических комплексов: SOLARSPeL, Сибирского Радиогелиографа (СРГ) (Бадары, ИСЗФ) и NoRP (Nobeyama), до рентгеновского излучения (РИ) – GOES-18/XRS, Fermi/GBM, Wind/Konus, SolO/STIX, ASO-S/HXI. Изображения источников МВ излучения получены в результате обработки данных СРГ для частот 9.0 и 11.8 ГГц; источники ультрафиолетового (УФ) излучения ($\lambda = 131 \text{ \AA}$ и $\lambda = 1600 \text{ \AA}$) определены по данным SDO/AIA, источники РИ –

по данным SolO/STIX и ASO-S/HXI. Магнитограммы получены из данных SDO/HMI.

В юго-западной части полутени основного пятна отрицательной магнитной полярности, рядом с нейтральной линией (НЛ) на фотосфере, располагалась область с высоким градиентом магнитного поля, который достигал значений ≈ 0.65 кГс/Мм (обозначена стрелкой на рис. 1а). Эта область соответствовала местоположению предвспышечных источников, которые указывают на вероятные узлы зарождения вспышки. Через окрестности этой области проходила система скрученных силовых линий магнитного поля, отображенных голубым и жёлтым цветом на рис. 1а. Исходя из этих данных, можно предположить, что как предвспышечные структуры, так и основная солнечная вспышка могли быть вызваны неустойчивостью данной системы силовых линий.

Проекция рассматриваемой области совпадала по пространственному положению с северной частью западной вспышечной ленты, а также с источниками в МВ- и рентгеновском диапазонах. В импульсной фазе вспышки источники жёсткого РИ (>20 кэВ) были сосредоточены вблизи вспышечных лент. Источник мягкого РИ находился между лентами, причем его центр яркости примерно совпадал с центром яркости источника МВ излучения (рис. 1б), который имел круговую поляризацию $\approx 17\%$.

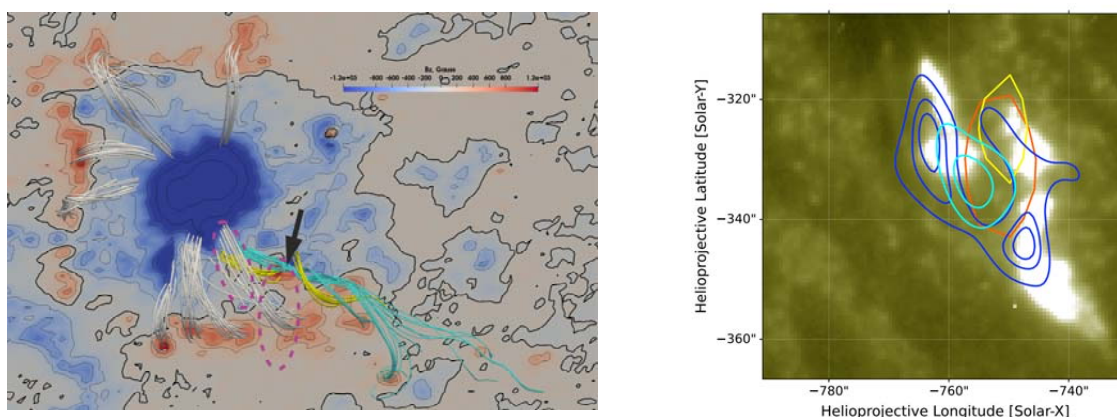


Рис. 1. (Слева, а) Предвспышечная магнитограмма SDO/HMI с нанесенными наборами силовых линий поля, реконструированного в нелинейном бессиловом приближении. Стрелкой отмечено положение предвспышечного источника. Вспышечные ленты – красные пунктирные контуры. (Справа, б) УФ изображение SDO/AIA 1600 Å с контурами МВ 9.0 ГГц (оранж.), 11.8 ГГц (желтый) по данным CPG и РИ 4-10 кэВ (циан), 25–50 КэВ (синий) по данным SolO/STIX.

Продолжительность импульсной фазы вспышки ≈ 60 с. Согласно данным в МВ и РИ, были зафиксированы 4 пика квазипериодических пульсаций (КПП). По данным рентгеновского инструмента GBM, а также STIX (см. Fig. 1 [7]) и временной производной теплового РИ в диапазоне 1.0–8.0 Å, удалось выделить пятый пик (рис. 2а). В целом, наблюдения в рентгеновском и МВ диапазонах согласуются с эффектом Нойперта [4]. На

основании этих данных можно заключить, что пульсации, вероятно, были вызваны серией кратковременных (4–5) эпизодов ускорения и инжекции электронов в сложную систему магнитных петель [7].

Наблюдается тенденция к сокращению временного интервала между соседними пиками КПП: для 1–2 пиков $P_{1-2} \approx 15$ с, для 2–3 пиков $P_{2-3} \approx 13$ с, а для 3–4 и 4–5 пиков $P_{3-4, 4-5} \approx 9$ с. Средний период колебаний КПП оценивается как ≈ 11.5 с. Вейвлет-анализ сглаженного и нормализованного сигнала с вычитанием тренда показывает значимый спектральный пик, соответствующий периоду ≈ 15.1 с (рис. 2б).

Большинство используемых инструментов для построения изображений (например, SDO/AIA) обладают временным разрешением, сопоставимым с периодом КПП или даже превышающим его. В связи с этим для анализа динамики «тонкой» пространственной структуры нами были использованы данные СРГ, который обеспечивает временное разрешение ≈ 3 с на каждой частоте из сетки частот СРГ. Это позволяет детально рассмотреть динамику источников микроволнового излучения в импульсной фазе солнечной вспышки.

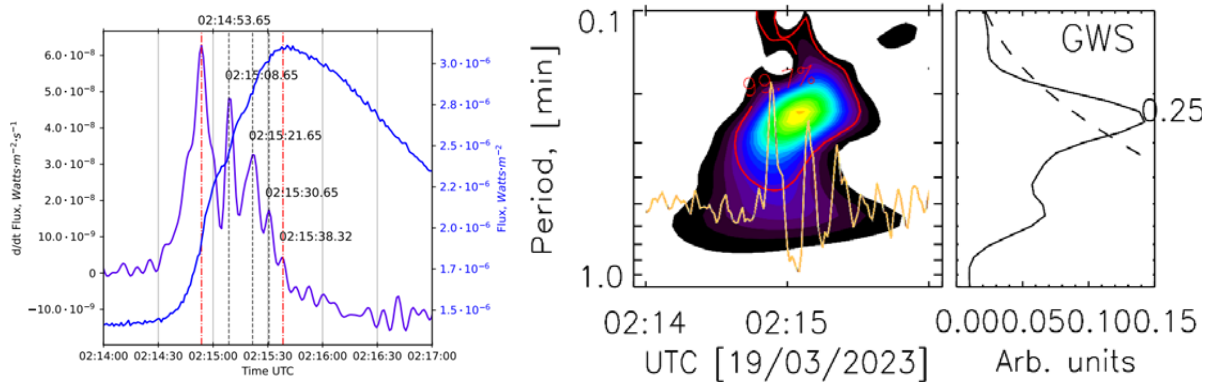


Рис. 2. (Слева, а) Временные профили РИ 1.0–8.0 Å и его производной по времени по данным GOES-18. (Справа, б) Вейвлетограмма и глобальный вейвлет-спектр нормированного сглаженного профиля производной по времени РИ 1.0–8.0 Å с вычтенным трендом (оранжевая кривая).

Был проведен анализ некоторых вероятных механизмов КПП для данного события на основе МГД осцилляций [2, 3, 5, 6]. Период наблюдаемых КПП находится в диапазоне характерных значений для осцилляций в корональных петлях [1–3]. В таблице приведены оценки основных мод колебаний, рассчитанные на основе следующих параметров, полученных из данных наблюдений и экстраполяции магнитного поля: длина петли $L \sim 10^9$ см, радиус поперечного сечения петли $a \sim 10^8$ см, напряжённость магнитного поля в петле $B \sim 10^3$ Гс, концентрация плазмы в петле $n \sim 10^{11}$ см $^{-3}$ (на основе оценки меры эмиссии ЕМ из данных XRS), температура плазмы $T \sim 10^7$ К (из данных XRS).

Как видно из таблицы, периоды основных мод колебаний не совпадают с наблюдаемыми периодами КПП в точности, однако они совпадают по порядку величины, что является типичным для исследований КПП.

Предварительный вывод: совокупность характеристик, выявленных на основе анализа наблюдений, позволяет предположить, что наблюдаемые пульсации в МВ и рентгеновском диапазонах отражают серию последовательных эпизодов энерговыделения, связанных с ускорением и инжекцией электронов в сложную систему магнитных петель АО.

Таблица. Периоды некоторых возможных мод МГД осцилляций корональных петель на основе оценок их параметров для рассматриваемой вспышки C2.8 19 марта 2023.

МГД механизмы	Оценочный период КПП
Глобальная перетяжная мода	$P_{\text{GSM}} = \frac{2L}{c_p} \approx 4 \text{ с}$
Радиальная мода	$P_{\text{RAD}} = \frac{a}{\sqrt{c_{s0}^2 + c_{A0}^2}} \approx 0.2 \text{ с}$
Глобальная изгибная мода	$P_{\text{GKM}} = \frac{2L}{c_K} < 4 \text{ с}$
Глобальная продольная мода	$P_{\text{GLM}} = \frac{2L}{c_{T0}} \approx 40 \text{ с}$
RLC мода (Зайцева-Степанова)	$P_{\text{RLC}} \sim 10 \cdot \frac{S_{17}}{I_{[11]}} \approx 3 \text{ с}$

Несмотря на большое количество проанализированных современных данных многоволновых наблюдений, мы не можем сделать однозначный вывод о механизме КПП. Вопрос о роли МГД осцилляций остаётся открытым. В частности, не ясно, каким образом МГД осцилляции могут модулировать процессы ускорения/инжекции электронов в комплексной системе корональных петель. Будут проведены дополнительные исследования для уточнения возможного сценария исследуемой солнечной вспышки и механизма КПП.

Литература

1. Nakariakov, V.M., Melnikov, V.F. // Space Science Reviews, 2009, v. 149, Issue 1-4, pp. 119-151
2. Kupriyanova, E., Kolotkov, D., Nakariakov, V., et al. // Solnechno-Zemnaya Fizika, 2020, 6. 3-29. 10.12737/szf-61202001
3. Zimovets, I.V., McLaughlin, J.A., Srivastava, A.K., et al. // Space Sci Rev, 2021, 217, 66.
4. Neupert, Werner // Astrophysical Journal, July 1968, vol. 153, p. L59.
5. Nakariakov V.M., Kolotkov D.Y., Kupriyanova E.G., et al. // Plasma Phys. and Controlled Fusio, 2019, v. 61, id. 014024.
6. Зайцев В.В., Степанов А.В. // Успехи физ. Наук, 2008, т. 178, № 11. С. 1165–1204.
7. Koynash, G., Sharykin, I., Zimovets, I. // Труды конференции ВАК-24 "Современная астрономия: от ранней Вселенной до экзопланет и черных дыр", (2024, accepted)