

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ – ИСТОЧНИКОВ РАДИОВСПЛЕСКОВ III ТИПА ВО ВРЕМЯ МОЩНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ

А.Д. Жмуркина, Л.К. Кашапова

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия,  
angelina.zh22@gmail.com

## INVESTIGATING PARAMETERS OF ACCELERATED ELECTRONS – SOURCES OF TYPE III RADIO BURSTS DURING A POWERFUL SOLAR FLARE

A.D. Zhmurkina, L.K. Kashapova

Institute of Solar-Terrestrial Physics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia  
angelina.zh22@gmail.com

**Аннотация:** Солнечная вспышка является феноменом, охватывающим все слои солнечной атмосферы, распространяется в межпланетную среду и оказывает влияние на околоземное космическое пространство. Электроны, ускоренные во время этого процесса до высоких энергий, взаимодействуя с плазмой солнечной атмосферы генерируют радиоизлучение, проявляющееся во всплесках разного типа. Связь между всплесками, произошедшими в разных областях радиоспектра может служить индикаторами распространения энергии во время вспышки от исходного места энерговыделения. В данной работе были проведены оценки скорости пучка ускоренных электронов и задержек радиоизлучения между разными спектральными диапазонами для мощной солнечной вспышки 9 мая 2023 г.

**Ключевые слова:** солнечные вспышки, радиовсплески III типа

**Abstract:** A solar flare is a phenomenon that involves all layers of the solar atmosphere, propagates into the interplanetary medium, and affects near-Earth space. Electrons accelerated to high energies during this process interact with the plasma of the solar atmosphere, generating radio emission manifested in bursts of various types. The relationship between bursts occurring in different regions of the radio spectrum can serve as an indicator of the energy propagation during a flare from the initial location of energy release. In this work, we have estimated the accelerated electron beam velocity and radio emission delays between different spectral bands for a powerful solar flare on 9 May 2023.

**Keywords:** solar flare, type III radio bursts

### ВВЕДЕНИЕ

Всплески III являются распространенным видом радиовсплесков, возникающим как результат распространения ускоренных во время солнечной вспышки электронов. Радиовсплески классифицируются в соответствии с тем, как быстро меняется их частота максимума всплеска с течением времени, известная как скорость дрейфа частоты. Для всплесков типа III характерна самая высокая скорость дрейфа по частоте, среди всех известных типов радиовсплесков. Радиовсплески III типа часто возникают в самом начале солнечных вспышек и указывают на момент первичного энерговыделения, когда запускаются процессы распространения выделившейся энергии в различные слои солнечной атмосферы. Эта особенность позволяет использовать их для установления спектрального диапазона, связанного с место первичного энерговыделения.

### АНАЛИЗ СОБЫТИЯ

Событие, которое мы исследовали, произошло 9 мая 2023 г. Это была мощная вспышка класса M6 по классификации GOES. Начальная фаза вспышки пришлось на 03:42 UT. Для анализа события использовались данные спектрополяриметра YAMAGAWA [<https://solarobs.nict.go.jp/>], спектрографа сети e-Callisto (ASSA, Австралия) [<https://www.e-callisto.org/>], и телескопа ASO-S/HXI [[http://aso-s.pmo.ac.cn/en\\_index.jsp](http://aso-s.pmo.ac.cn/en_index.jsp)], который дает

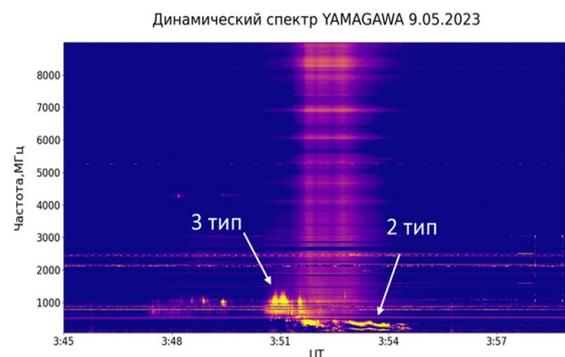


Рис. 1. Динамический спектр солнечной вспышки 9 мая 2023 г.

информацию об излучении в рентгеновском диапазоне. На динамическом спектре YAMAGAWA (рис. 1) можно увидеть серию всплесков III типа, а также всплеск II типа (рис. 1), связанный с выбросом корональной массы.

Для исследования скорости дрейфа радиовсплесков, наблюдавшихся в начале вспышки, были использованы динамические спектры одной из станций сети спектрографов e-Callisto (рис. 2) в диапазоне частот до 100 МГц. Мы видим, что мощные радиовсплески III типа наблюдались в период с 03:51 до 03:53 UT. Задержка между максимумами первого всплеска на частотах 50 МГц и 80 МГц была 4.8 сек, что дает скорость дрейфа равную -6.3 МГц/с.

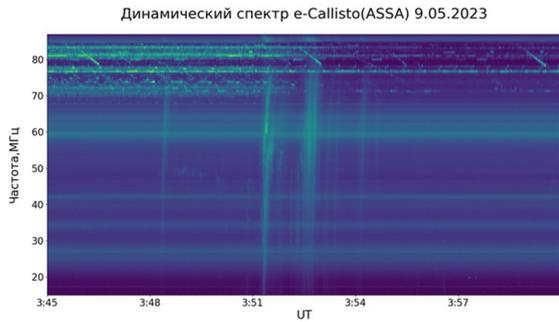


Рис. 2. Динамический спектр в диапазоне 10–90 МГц по данным спектрографа сети e-Callisto

Известно, что основным механизмом появления радиовсплесков III типа является плазменное излучение. Согласно теории, поток ускоренных электронов генерирует ленгмюровские волны. Часть энергии волн Ленгмюра преобразуется в электромагнитные волны, которые могут регистрироваться радиотелескопами. [Dulk, 1985] Так как ленгмюровские волны — это колебания плазмы с плазменной частотой  $f_p$ , то мы можем использовать выражение для связи плазменной частоты с электронной концентрацией  $N_e$

$$f_p = \sqrt{\frac{N_e e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e}}, \quad (1)$$

где  $m_e$  — масса электрона,  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная.

Для связи концентрации и расстояния, на которое пролетел поток электронов, использовалась модель распределения электронной плотности Ньюкирка, с коэффициентом  $\alpha = 3$ , что соответствует умеренно активному Солнцу. [Newkirk, 1961]

$$N_e = N_0 \cdot \alpha \cdot \left(10^{4,32 \frac{R_0}{R}}\right), \quad (2)$$

где  $\alpha$  — коэффициент увеличения электронной плотности,  $R$  — расстояние от центра Солнца,  $R_0$  — радиус Солнца.

Согласно нашим расчетам скорости движения потока ускоренных электронов получились  $v \approx 0.22c$ , где  $c$  — скорость света в вакууме; и энергия  $E \approx 12$  кэВ. Оценка времени пролета от места первичного энерговыделения до области формирования излучения на частоте 80-МГц составляет 22 сек. Сдвиг на это время указывает на всплеск на частоте 1 ГГц (см. рис. 3). Этот спектральный диапазон наиболее вероятно связан с местом первичного энерговыделения.

Сравнение временных профилей в диапазоне рентгеновского излучения (20–50 кэВ) и излучения в спектральном диапазоне предполагаемого места

формирования первичного энерговыделения показано на рис. 3 и также подтверждает эту гипотезу. Мы видим хорошее соответствие между рентгеновским и микроволновым временными профилями в области роста потока, это свидетельствует о том, что частота первичного энерговыделения действительно находится в области 1 ГГц.

Временные профили по данным разных инструментов

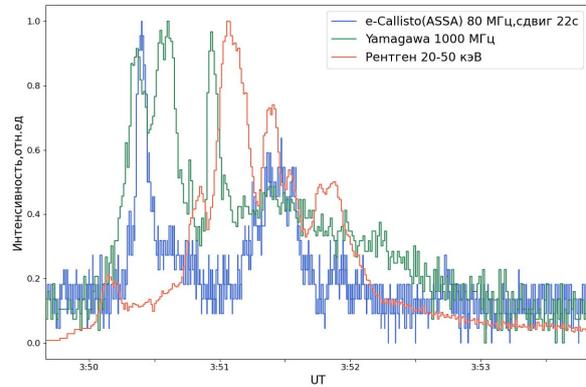


Рис. 3. Эволюция излучения в разных спектральных диапазонах

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Скорости потоков электронов близки к среднестатистическим значениям, полученным ранее другими авторами, 0.3 с, где  $c$  — скорости света. Энергии электронов генерировавших радиовсплески в начале вспышке 10–20 кэВ. Анализ теоретически полученных и измеренных задержек между временными профилями в разных спектральных диапазонах, место первичного энерго выделения находилось в области формирования микроволнового излучения на частоте 1 ГГц.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Dulk G.A. Radio emission from the sun and stars // Annu. Rev. Astrophys. 1985. V. 23. P. 169–224.
- Newkirk G. The solar corona in active regions and the thermal origin of the slowly varying component of solar radio radiation // Astrophys. J. 1961. V. 133. P. 983–1013.  
URL: [http://aso-s.pmo.ac.cn/en\\_index.jsp](http://aso-s.pmo.ac.cn/en_index.jsp) (дата обращения 23.05.2024).
- URL: <https://solarobs.nict.go.jp/> (дата обращения 23.05.2024).
- URL: <https://www.e-callisto.org/> (дата обращения 23.05.2024).