

**ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОВОЛНОВЫХ ИСТОЧНИКОВ
В ДИАПАЗОНЕ 3–12 ГГц ВО ВРЕМЯ ИМПУЛЬСНОЙ ФАЗЫ
ЛИМБОВОЙ ВСПЫШКИ 5 ФЕВРАЛЯ 2023 ГОДА**

Шамсутдинова Ю.Н., Кашапова Л.К., Жданов Д.А.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

**EVOLUTION OF MICROWAVE SOURCES IN THE RADIO
RANGE 3-12 GHz DURING THE IMPULSIVE PHASE
OF THE LIMB SOLAR FLARE**

Shamsutdinova J.N., Kashapova L.K., Zhdanov D.A.

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

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-353-356>

We present the study results of the dynamics of the spatial structure and spectral properties of microwave sources of the limb solar flare on February 3, 2023. We found hot and cold (dark) cusp-shape structures on the SDO/AIA 193 Å images. Such structures are a typical feature of an eruptive flare in the standard model, and they are associated with magnetic reconnection and particle acceleration. The eruption was connected with the dark cusp. The temporal profile, obtained by ASO-S/HXI in the range 50–100 keV, indicates the accelerated electrons during the event. The purpose of this work is analyzing of the dynamics of electron acceleration and precipitation using microwave observations of Siberian Radioheliograph (SRH) in the range 3–12 GHz.

Важным индикатором наличия или отсутствия ускоренных частиц во время солнечных вспышек является форма микроволнового спектра [1]. В зависимости от того, представляет ли спектр зависимость потока или яркостной температуры от частоты, мы будем наблюдать различные формы его наклона как в высокочастотной, так и в низкочастотной частях. Разделение на эти части происходит с помощью пиковой частоты, которая также отделяет диапазоны частот соответствующих оптически тонкому или оптически толстому источникам излучения [2]. Для вспышки, расположенной на диске, пространственную структуру микроволнового источника исследовать сложно из-за наличия проекционных эффектов. Поэтому для анализа вспышечных источников лучше всего подходят лимбовые события. Например, событие в [3], где авторам удалось разделить компактный вспышечный источник и место первичного энерговыделения.

Исследуемое лимбовое событие 5 февраля 2023 года с максимумом в 03:24:40UT (положение [950";150"]) наблюдалось Сибирским Радиогелиографом (СРГ) [4] с временным разрешением около 3 секунд в диапазоне 3–12 ГГц. Уникальное положение события и возможность наблюдать его в широком диапазоне частот позволяют нам провести анализ пространственной структуры источника и выявить механизмы излучения с помо-

пью спектрального анализа. Мы выбрали фазу роста как наиболее интересную с точки зрения начала и развития процессов ускорения. Помимо данных СРГ мы использовали для первичного анализа момента максимума микроволнового спектра в широком диапазоне наблюдательные данные Бадарского широкополосного микроволнового спектрополяриметра (БШМС) [5] в диапазоне 4–8 ГГц в сочетании с данными радиополяриметра Нобеяма (NoRP) [6] в диапазоне 1–35 ГГц. Топология вспышечных источников анализировалась с помощью изображений в крайнем ультрафиолете (КУФ) в полосах 131 и 193 Å SDO/AIA [7]. Наличие наблюдений HXI/ASO-S [8] позволили провести анализ рентгеновского излучения в диапазоне 10–300 кэВ.

Согласно среднему микроволновому спектральному анализу по данным БШМС и NoRP пиковая частота микроволнового спектра находится около 5 ГГц. Это означает, что изображения на 9 и 3 ГГц показывают оптически тонкий и толстый источники излучения, соответственно. На данных частотах были построены временные профили по данным СРГ, представленные на рисунке 1 (левая панель). Наличие значительных потоков рентгеновского излучения в энергетической полосе 20–100 кэВ по данным HXI/ASO-S указывает на присутствие ускоренных электронов во время события. Временные профили демонстрируют то, что событие было быстрым с максимумом около 03:24:40 UT. Мы полагаем, что вспышка началась около 03:24 UT, и поэтому для исследования были выбраны несколько моментов времени на фазе роста, описывающие процессы ускорения и распространения электронов в течение первых 40 секунд.

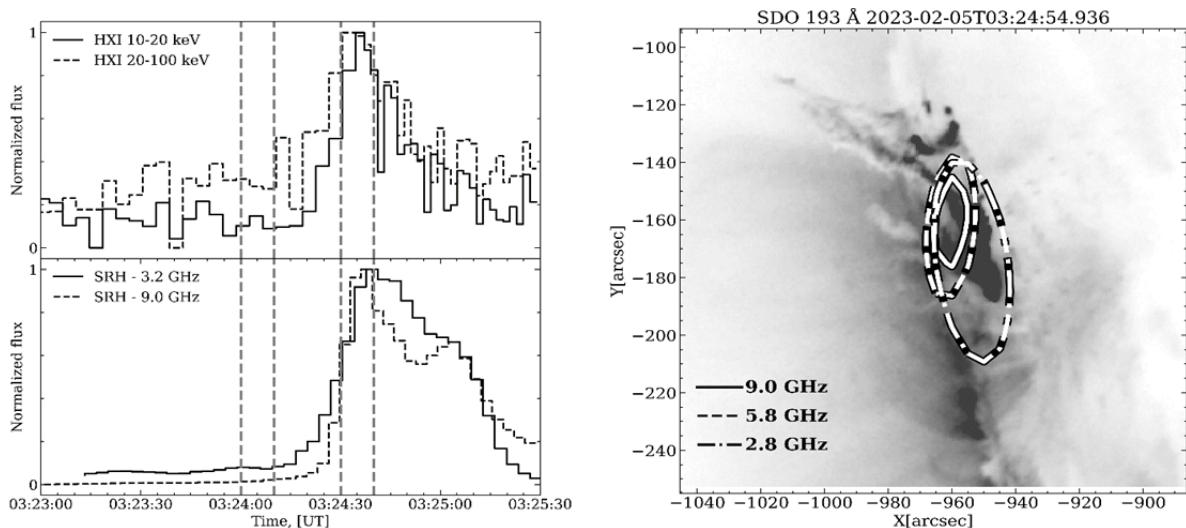


Рис. 1. *Левая панель:* временные профили в рентгеновском и микроволновом диапазоне по данным HXI и СРГ. Пунктирные линии показывают выбранные моменты времени на фазе роста. Временные профили на частотах 9 ГГц и 10–20 кэВ указывают на наличие нетепловых электронов. *Правая панель:* эволюция микроволновых источников во время солнечной вспышки.

Для исключения артефактов, связанных с ошибками ориентации, положение солнечного диска на изображениях СРГ для выбранных моментов времени на частотах 3–12 ГГц проверялось и корректировалось с использованием центров источников для нескольких активных областей, располагавшихся на диске. В качестве центра выбирался пиксел с самой большой яркостной температурой или центр масс источника. Выделялась одна частота, для которой положение изображения корректировали с помощью магнитограммы и изображения поляризации V. Сдвиги по координатам для всех остальных частот были найдены относительно скорректированного центра источника на выбранной частоте. Для анализа активной области мы использовали вычтенные изображения на фазе роста, полученные путем отнимания изображения Солнца в момент времени до вспышки, чтобы убрать вклад квазистационарных источников излучения.

На рисунке 1 (правая панель) контурами показаны микроволновые источники на КУФ изображении в полосе 193 Å для момента максимума вспышки. Можно видеть, что микроволновый источник является компактным и находится над горячим каспом, а темный касп связан с эрупцией. Каспоподобные структуры являются особенностью эруптивной вспышки в стандартной модели, и их связывают с магнитным пересоединением и ускорением частиц. Отметим, что часть микроволнового вспышечного источника на частоте около 3 ГГц находится над петельной структурой. Однако на других частотах микроволновый вспышечный источник выглядит компактным без четко выраженной высотной структуры, и мы можем определить его центр. На рисунке 2 (левая панель) показаны положения центров микроволнового вспышечного источника для моментов времени,

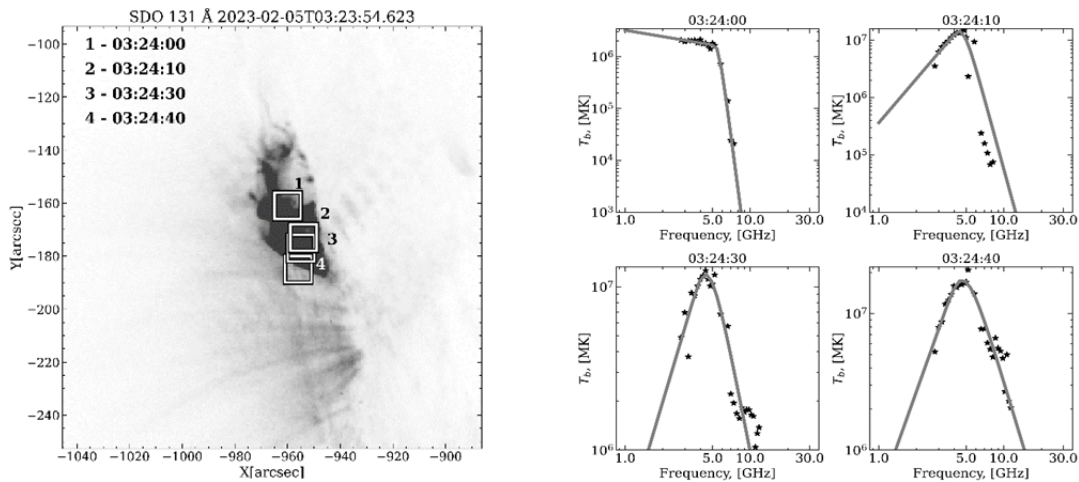


Рис. 2. Левая панель: расположение микроволновых источников по данным СРГ в диапазоне частот 3–12 ГГц в выбранные моменты времени на фазе роста. Прямоугольники показывают области для получения микроволновых спектров. Правая панель: микроволновые спектры яркостной температуры для моментов времени на фазе роста в диапазоне частот 3–12 ГГц. Значения яркостной температуры относятся к максимальным значениям в выбранных областях на левой панели.

представленных на рисунке 1 (левая панель). Мы видим, что положение источника на фазе роста, включая момент максимума, опустилось вниз. Для каждого момента времени был построен спектр в центре источника для яркостной температуры. Они представлены на рисунке 2 (правая панель). Полученные микроволновые спектры демонстрируют изменение механизма излучения. На начальной стадии фазы роста наблюдается гиросинхротронное излучение тепловых электронов, через 10 секунд излучение преобразуется в гиросинхротронное нетепловых электронов, которое характеризуется наличием ускоренных частиц. Также наблюдается постепенное увеличение значений яркостной температуры.

На основании проделанного анализа лимбовой вспышки 5 февраля 2023 года мы можем сделать вывод, что компактный вспышечный микроволновый источник в диапазоне 3–12 ГГц на импульсной фазе был связан с горячим каспом, который является индикатором места ускорения электронов. Наличие ускоренных электронов во время данного события также подтверждается рентгеновскими потоками в диапазоне свыше 20 кэВ. По наблюдениям СРГ развитие микроволнового источника на фазе роста вспышки сопровождалось переходом от гиросинхротронного излучения тепловых электронов к излучению нетепловых электронов согласно анализу микроволновых спектров.

Авторы благодарят коллективы инструментов ASO-S/HXI, SDO/AIA, СРГ, YAMAGAWA за предоставление открытого доступа к данным наблюдений, а также «Ангара» за предоставление данные ББМС.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Литература

1. Dulk G. // Annual Rev. Astron. Astrophys., 1985, vol. 23, pp. 169-224.
2. Bastian T.S. et al. // Annual Rev. Astron. Astrophys., 1998, vol. 36, pp. 131-188.
3. Kou Y. et al. // Nat. Comm., 2022, vol. 13.
4. Lesovoi S. et al. // Sol.-Terr. Phys., 2017, vol. 3, pp. 3-18.
5. Zhdanov D. & V. Zandanov // Solar Phys., 2015, vol. 290, no. 1, pp. 287-294.
6. Torii C. et al. // NURIA Proceedings, 1979, vol. 26, pp. 129-132.
7. Lemen J.R. et al. // Solar Phys., 2012, vol. 275, no. 1-2, pp. 17-40.
8. http://aso-s.pmo.ac.cn/en_index.jsp