

МЕСТО ПЕРВИЧНОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ И РАДИОВСПЛЕСКИ III ТИПА ВО ВРЕМЯ НАЧАЛА МОЩНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ

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

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

THE INITIAL ENERGY RELEASE, LOCATION, AND TYPE III RADIO BURSTS THAT OCCURRED AT THE ONSET OF A POWERFUL SOLAR FLARE

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

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

We present the results of the analysis of the impulsive phase of the M6.5 GOES class solar flare, which occurred on May 9, 2023 and was associated with a powerful type III radio burst. The velocity of electron fluxes generated by type III radio bursts can be estimated from dynamic spectra. This value allows us to estimate the travel time of electrons from their initial release site and reveal a frequency associated with this process. According to the analysis, the source of type III radio bursts was located within the region of 1 GHz emission formation. However, corresponding bursts at higher microwave frequencies, which correspond to gyro-synchrotron emission and hard X-rays, were detected 12 seconds earlier than the burst at 1 GHz. The spatial structure analysed using ASO-S/HXI X-ray images and microwave images from the Siberian Radioheliograph indicates the existence of a flare loop and a high-energy X-ray source at the top of the flare loop at the early phase of flare evolution. The delay between microwave and X-ray emissions, and the burst at a frequency of 1 GHz, indicates a secondary nature for type III radio bursts. The position and shape of the sources in the microwave and X-ray ranges indicate the height of the primary energy release at about 15 Mm, consistent with the idea of the location of the X point, which previous researchers have associated with successive reconnections.

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-153-156>

Радиовсплески III типа являются распространенным видом всплесков, который выделяют на динамическом спектре и возникают как результат распространения ускоренных во время солнечной вспышки электронов во внешние слои солнечной короны и межпланетную среду. Общепринято, что механизм генерации излучения этих явлений плазменный и связан с ленгмюровскими волнами [1]. Таким образом, величина скорости дрейфа этих всплесков позволяет сделать оценку скорости распространения ускоренных электронов и как следствие энергию частиц. Радиовсплески III типа часто наблюдаются в самом начале солнечных вспышек и могут служить индикаторами начала процессов энерговыделения, а задержка, полученная из оценки скорости распространения ускоренных электронов, дает возможность использовать их выявление положения и свойств места первичного энерговыделения. В работе [2] было показано, что задержки меж-

ду метровым и микроволновым диапазонами, рассчитанные с использованием оценок параметров ускоренных электронов, с точностью до ошибки измерений совпадает с экспериментальной задержкой между радиовсплесками III типа и всплесками в микроволновом диапазоне. Однако, радиовсплески могут иметь и вторичную природу и возникать в токовом слое на значительно большей высоте, чем расположено место первичного энерговыделения как результат отклика на этот процесс [3]. Целью данной работы было проверить насколько подход, предложенный в работе [2], может быть использован для выявления места первичного энерговыделения на начальных стадиях мощных солнечных вспышек.

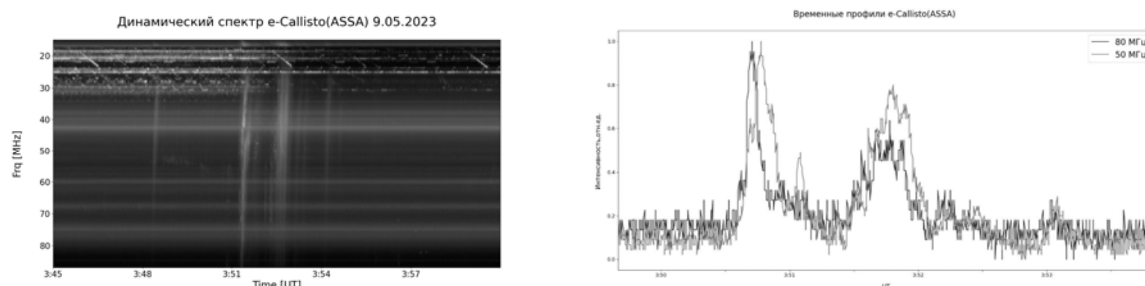


Рис. 1. *Левая панель:* Динамический спектр, полученный спектрографом сети e-Callisto. *Правая панель:* Временные профили на частотах 50 (серый цвет) и 80 МГц (темно-серый цвет), использованные для измерения скорости дрейфа радиовсплеска III типа.

Исследуемая солнечная вспышка произошла 9 мая 2023 года с максимумом в 03:52 UT (положение [410", 280"]) и наблюдалось широким набором инструментов, в том числе и с пространственным разрешением в микроволновом диапазоне (Сибирский Радиогелиграф (СРГ) 3–12 ГГц, [4]), а в жестком рентгеновском диапазоне 10–300 кэВ (HXI/ASO-S [5]). Особенностью данного события были квазипериодические колебания, зафиксированные в рентгеновском и микроволновом диапазонах, которые авторы [6] связали с последовательным пересоединением в токовом слое. На динамическом спектре спектрографа сети e-Callisto (ASSA) видны радиовсплески III типа во время всего события (рис. 1, левая панель). Мы выбрали для анализа первый радиовсплеск и рассчитали скорость дрейфа, используя временные профили на частотах 50 и 80 МГц (рис. 1, правая панель). Задержка между максимумами всплесков была оценена как 4.8 секунды. Считая, что излучение исследуемого радиовсплеска формируется второй гармоникой плазменного механизма, применяя стандартную методику оценки формирования излучения (как, например, в работе [2]) и используя модель плотности солнечной атмосферы Newkirk [7], получаем скорость движения электронов равной $0.2c$, где c – скорость света. При возможной высоте первичного энерговыделения порядка 10 Мм время задержки между всплеском в метров диапазоне на частоте 80 МГц и всплеском в микро-

волновом диапазоне составляет порядка 21 секунды. Сдвиг временного профиля на частоте 80 МГц на эту величину указывает на всплески в микроволновом диапазоне на частоте около 1 ГГц.

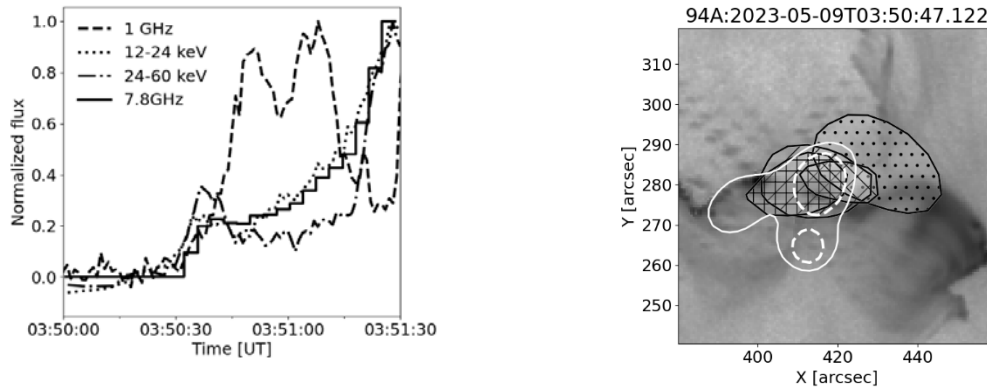


Рис. 2. *Левая панель:* Временные профили излучения во время начала вспышки в микроволновом и рентгеновском диапазонах. *Правая панель:* Вспышечные источники в микроволновом, рентгеновском и КУФ диапазонах во время начала вспышки 03:50 UT. Изображение показывает топологию активной области в полосе 94 Å SDO/AIA. Белые контуры показывают источники рентгеновского излучения в полосах 12–24 кэВ (сплошной контур) и 24–50 кэВ (штрихи) на уровне 10 и 30 процентов от максимума, соответственно. Заштрихованными контурами показаны микроволновые источники по данным СРГ на частотах 3.8 ГГц (точки), 5.2 ГГц (//), 7.4 ГГц (+) и 11.4 ГГц(\\).

Сравнение временных профилей вспышки на частоте 1 ГГц (данные спектрополяриметра YAMAGAWA) с временными профилями СРГ в микроволновом диапазоне и временными профилями рентгеновского излучения показывает, что, несмотря на общее начало увеличения потока, максимум на частоте 1 ГГц наступает на 12 секунд позже, чем в других диапазонах (рис. 2, левая панель). Это указывает на то, что первичное энерговыделение произошло раньше и его место было ближе к области формирования рентгеновского и микроволнового излучения выше 3 ГГц, чем к месту формирования излучения 1 ГГц. Кроме того, величина задержки указывает, что причиной генерации излучения на частоте 1 ГГц мог быть волновой процесс. Анализ топологии вспышечных источников в микроволновом и рентгеновском диапазонах, а также в крайнем ультрафиолетовом (КУФ) диапазоне в полосе 94 Å SDO/AIA [7] показал существование горячей вспышечной петли на ранней стадии развития вспышки (рис. 2, правая панель). В вершине этой петли выявлен рентгеновский источник в полосе энергий 24–50 кэВ, совпадающий по положению с микроволновыми источниками в диапазоне 3–12 ГГц. Этот факт указывает на наличие большого числа ускоренных электронов в вершине вспышечной петли и рассматривается как возможный указатель места первичного энерговыделения во вспышке, удовлетворяющей «стандартной» модели.

На основании выполненного анализа можно сделать вывод о том, что источник радиовсплесков III типа, наблюдавшихся в начале солнечной вспышки 9 мая 2023 года, находился в области формирования излучения на частоте 1 ГГц. Задержка между микроволновым рентгеновским излучением и излучением на частоте 1 ГГц указывает на вторичную природу радиовсплесков III типа. Положение и форма источников в микроволновом и рентгеновском диапазонах указывает на высоту первичного энерговыделения около 15 Мм, согласуется с представлением о положении X-точки, которую предыдущие исследователи связали с причиной наблюдавшихся во время основной фазы квазипериодических колебаний – последовательным пересоединением.

Авторы благодарят коллективы инструментов ASO-S/HXI, SDO/AIA, CPT, YAMAGAWA, e-Callisto за предоставление открытого доступа к данным наблюдений,

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Литература

1. Reid, H.A.S., H. Ratcliffe // *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2014, vol. 14, pp. 773-804.
2. Shamsutdinova J.N. et al. // *MNRAS*, 2024, vol. 533, pp.1453-1462.
3. Benz A.O. et al. // *Solar Phys.*, 2011, vol. 273, p. 363-375.
4. Алтынцев А.Т. и др. // *Солнечно-земная физика*, 2020, т. 6, N 2, с. 37-50.
5. Gan W. et al. // *Solar Physics*, 2023, vol. 298, article id.68.
6. Wu Z. et al. // *The Astrophysical Journal*, 2024, vol. 968, id.5, 11 pp.
7. Newkirk G. // *Annual Rev. Astron. Astrophys.*, 1967, vol. 5, p. 213.
8. Lemen J.R. et al. // *Solar Phys.*, 2012, vol. 275, no. 1-2, pp. 17-40.