

---

## ЯРКИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЕ УЗЛЫ КАК ВОЗМОЖНЫЕ ИСТОЧНИКИ КОГЕРЕНТНОГО МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

### BRIGHT ULTRAVIOLET KNOTS AS POSSIBLE SOURCES OF COHERENT MICROWAVE RADIATION

---

**Н.С. Мешалкина**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, nata@iszf.irk.ru*

**А.Т. Алтынтцев**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, altyntsev@iszf.irk.ru*

**N.S. Meshalkina**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, nata@iszf.irk.ru*

**A.T. Altyntsev**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, altyntsev@iszf.irk.ru*

---

**Аннотация.** Особенностью события 6 сентября 2012 г. явилось то, что источники узкополосных (2–4 ГГц) субсекундных импульсов (ССИ) наблюдались в небольших областях вспышечных петель с так называемыми яркими ультрафиолетовыми узлами, которые характеризовались высокой плотностью плазмы до  $10^{11}$  см<sup>-3</sup>. Временные профили жесткого рентгеновского излучения вспышки хотя и подобны микроволновым кривым блеска, но не имеют структур, соответствующих ССИ. Анализ микроволновых, рентгеновских и ультрафиолетовых данных показал, что наблюдаемые импульсы микроволнового излучения с узкой спектральной полосой имеют когерентную природу и генерируются электронами с энергиями нескольких десятков килоэлектронвольт в ярких узлах на частоте около удвоенной плазменной. Результаты наблюдений свидетельствуют, что появление ярких узлов связано с локальными процессами энерговыделения при взаимодействии вспышечных петель.

**Ключевые слова:** Солнце, тонкая временная структура, яркие узлы в ультрафиолете, микроволновые всплески, когерентное излучение.

---

**Abstract.** A distinctive feature of the September 6, 2012 event was that sources of narrow-band (2–4 GHz) sub-second pulses (SSP) were observed in small areas of flare loops with so-called bright ultraviolet knots with high plasma density up to  $10^{11}$  cm<sup>-3</sup>. Time profiles of hard X-rays of the flare, although similar to microwave light curves, do not have structures corresponding to SSP. Analysis of microwave, X-ray, and ultraviolet data has shown that the observable pulses of microwave radiation with a narrow spectral band are coherent in nature and are generated by electrons with energies of several tens of kiloelectronvolt in bright knots at a double plasma frequency. The results of the observations suggest that the appearance of bright knots is associated with local processes of energy release due to interaction of flare loops.

**Keywords:** Sun, fine temporal structure, UV bright knots, microwave bursts, coherent emission.

---

## ВВЕДЕНИЕ

Радионаблюдения могут давать уникальную информацию об ускорении нетепловых электронов, способную существенно дополнить данные наблюдений в рентгене и ультрафиолете. Например, в радиодиапазоне можно регистрировать в благоприятных условиях отклики на появление слабых потоков нетепловых частиц, недоступные для наблюдений современными рентгеновскими телескопами. Особый интерес представляют интенсивные импульсы узкополосного радиоизлучения продолжительностью менее 1 с, которые, как правило, накладываются на всплеск большей длительности и отражаются в спектре как тонкие спектральные структуры.

Тонкая временная структура солнечного излучения исследуется несколько десятилетий, с тех пор как появились регулярные наблюдения, сочетающие высокое пространственное и спектральное разрешение [Benz, 1986]. Совместные наблюдения в микроволновом и рентгеновском диапазонах показали, что

субсекундным импульсам (ССИ) соответствует, как правило, усиление активности в жестком рентгеновском излучении, однако, за исключением широкополосных ССИ, не наблюдается соответствия импульс-импульс. Широкополосные ССИ с полосой более десятка гигагерц генерируются интенсивными электронными потоками с энергией несколько сотен килоэлектронвольт гиросинхротронным механизмом [Altyntsev et al., 2019].

Генерация узкополосных микроволновых всплесков с шириной мгновенного спектра менее 2 ГГц возможна в случае неустойчивой функции распределения нетепловых электронов по скоростям, пучковой или конусной [Benz, 1986]. Для генерации ССИ в микроволновом диапазоне, помимо существования неравновесной популяции нетепловых электронов, возбуждающей плазменные колебания, необходима последующая конвертация турбулентности продольных колебаний в поперечные электромагнитные волны. К уменьшению длительности

ССИ относительно жестких рентгеновских импульсов может также приводить нарушение условий выхода электромагнитного излучения к наблюдателю на частотах, близких к плазменным. Несмотря на трудности обнаружения ССИ, подробно рассмотренные в обзорах [Флейшман, Мельников, 1998; Алтынцев и др., 2023], узкополосные ССИ являются уникальным по чувствительности индикатором появления ускоренных частиц во вспышечных процессах.

В обзоре [Алтынцев и др., 2023] обсуждаются исследования всплесков с тонкой временной структурой в микроволновом (сантиметровом) диапазоне (частоты выше 3 ГГц), источники которых расположены в окрестностях областей первичного энерговыделения вспышек, где ускоряются электроны, в низких вспышечных петлях. На частоте 5.7 ГГц, относящейся к этому диапазону, велись наблюдения на Сибирском солнечном радиотелескопе (ССРТ) с высоким пространственным и временным разрешением с 2000 по 2013 г. За это время был накоплен архив, содержащий более 200 событий с субсекундными импульсами. С 2010 г. архив дополнен динамическими спектрами, полученными Бадарским широкополосным микроволновым спектрополяриметром (БШМС) [<https://badary.iszf.irk.ru/Ftevents.php>]. ССИ связаны со вспышечной деятельностью активных областей, генерируются в узкой полосе частот (до 2 ГГц) когерентным механизмом и довольно редки: они наблюдались в ~10 % всплесков на частоте 5.7 ГГц [Zhdanov, Zandanov, 2015; Алтынцев и др., 2023].

Основной причиной редкости наблюдений ССИ является поглощение их излучения в окрестности источника, поскольку частота их излучения близка плазменной частоте или ее гармонике [Benz et al., 1992]. Для регистрации ССИ на частоте приема ССРТ 5.7 ГГц плотность плазмы в источнике должна достигать  $10^{11} \text{ см}^{-3}$  и уменьшаться по лучу зрения на масштабе не более тысячи километров [Altyntsev et al., 2007]. Поэтому интересно исследовать связь появления узкополосных всплесков когерентного излучения с яркими узлами во вспышечных петлях, видимыми в крайнем ультрафиолетовом (КУФ) [Cheng, 1980; Widing, Hiei, 1984; Golub et al., 1999; Warren, 2000] и в мягком рентгеновском излучении [Lin et al., 1984; Shimizu et al., 1994; Doschek et al., 1995].

Doschek et al. [1995] обнаружили компактные области повышенной яркости в вершине петель, видимые в мягком рентгеновском излучении, зарегистрированном спутником *Yohkoh*. Температуры в них достигали 7–20 МК, а электронные плотности —  $10^{11}$ – $10^{12} \text{ см}^{-3}$ . На эти яркие узлы приходилось 30 % меры эмиссии от общего значения.

В работе [Kołománski et al., 2017] на стадии спада вспышки были обнаружены с помощью AIA/SDO в вершине вспышечной петли мелкомасштабные (несколько угловых секунд) горячие (10 МК) источники ультрафиолетового излучения. Моделирование рентгеновского излучения по КУФ-данным не показало наличия компактных источников.

Свойства ярких КУФ-узлов можно суммировать следующим образом:

1) высокая температура — от 1 до 10 МК;

2) компактность — размер не превышает нескольких угловых секунд;

3) продолжительность — время жизни составляет от нескольких секунд до десятка минут;

4) интенсивность — яркость индивидуальных пикселей может в несколько раз превышать средние значения в окрестности;

5) движение — зарегистрированные скорости составляют десятки километров в секунду;

6) высокая плотность — достигает  $10^{11}$ – $10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

Предложены две гипотезы образования ярких узлов. Первая предполагает, что эти тонкоструктурные яркие образования связаны с мелкомасштабными событиями пересоединения в малых петлях размерами ниже разрешения TRACE или SXT/Yohkoh [Tsuneta et al., 1991; Shimizu et al., 1994; Doschek et al., 1995; Warren, 2000]. Вторая гипотеза предложена в работе [Patsourakos et al., 2004], в которой обсуждались наблюдения ярких узлов на спутнике TRACE [Handy et al., 1999] и было обнаружено их движение. Авторы предположили, что образование узлов связано с нарушением баланса между нагревом и радиационным охлаждением в локальных областях магнитных петель.

Мы выполнили детальный анализ многоволновых наблюдений вспышки 6 сентября 2012 г. Это событие необычно тем, что тонкая временная структура наблюдалась на главной фазе вспышки, в которой в нескольких каналах КУФ на аппарате AIA/SDO наблюдались так называемые яркие узлы во вспышечных петлях. Цель настоящей работы — исследовать отклик в микроволновом излучении на яркие узлы, видимые в КУФ.

## ИНСТРУМЕНТЫ И МЕТОДЫ

Сибирский солнечный радиотелескоп записывал одномерные (1D) сканы диска Солнца на частоте 5.7 ГГц с временным разрешением 14 мс на лучах восток–запад (ВЗ/ЕW) и север–юг (СЮ/NS) [Altyntsev et al., 2003; Meshalkina et al., 2012]. Ширина диаграммы направленности ССРТ составляла 22" и 20" в направлениях ВЗ и СЮ соответственно. Мы использовали последовательности 1D-сканов ССРТ для выявления коротких всплесков радиоизлучения длительностью менее секунды. 1D-сканы использовались также для локализации источников ССИ на солнечном диске. ССРТ записывал также двумерные (2D) изображения солнечного диска каждые две-три минуты [Grechnev et al., 2003; Kochanov et al., 2013]. 2D-изображения использовались для изучения свойств и местоположения фонового источника микроволнового всплеска в ходе вспышки.

Для измерения спектра использовались данные Бадарского широкополосного микроволнового спектрополяриметра [Zhdanov, Zandanov, 2011] в диапазоне частот 4–8 ГГц с временным разрешением 10 мс. Последовательности изображений, полученные с помощью радиогелиографа Нобеяма (NoRH) [Nakajima et al., 1994] на частоте 17 ГГц, использовались для изучения пространственного распределения радиовсплеска и вариаций интенсивности излучения с разрешением до 10". Кривые блеска были измерены радиополяри-

метрами Нобеема (NoRP) [Torii et al., 1979] с разрешением 1 с на частотах 1, 2, 3.75, 9.4, 17, 35 ГГц.

Данные о спектральных и пространственных характеристиках КУФ-излучения брались в базе Solar Dynamic Observatory (SDO) [Pesnell et al., 2012]. Использовались изображения полного солнечного диска с разрешением 0.6", записываемые прибором AIA каждые 12 с [Lemen et al., 2012]. Шесть оптически тонких каналов SDO/AIA EUV (171, 193, 211, 131, 335 и 094 Å) использовались для расчета меры эмиссии при температурах  $5.5 < \lg T < 7.5$ . Дифференциальная мера эмиссии рассчитывалась методом инверсии [Cheng et al., 2012].

Fermi Gamma-Ray Burst Monitor (Fermi/GBM) [Meegan et al., 2009] — прибор на борту Космического телескопа Ферми [Atwood et al., 2009], который обеспечивает кривые блеска в спектральном диапазоне от 8 кэВ до 40 МэВ; временное разрешение 256/64 мс.

Мы использовали данные Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) [Lin et al., 2002] для получения кривых блеска с временным разрешением 100 мс для изучения временной структуры рентгеновского излучения, а также для построения изображений с разрешением 4 с.

Мы привлекали также данные сети RSTN (Radio Solar Telescope Network) [Guidice et al., 1981], состоящей из четырех станций: в Леармонте (Австралия) (эти данные использованы в нашем исследовании), Сан-Вито (Италия), Сагамор-Хилле (США) и Палехуа (США), измеряющих интенсивность на восьми частотах (245, 410, 610, 1415, 2695, 4995, 8800 и 15400 МГц) с разрешением 1 с.

## НАБЛЮДЕНИЯ

Вспышка 6 сентября 2012 г. произошла в активной области (АО) 1564 и длилась с 02:32 по 02:44 UT (мировое время), класс вспышки по GOES C2.4. На главной фазе этой вспышки наблюдалась тонкая временная структура, зарегистрированная ССРТ. На рис. 1 приведены кривые блеска вспышки в мягком рентгеновском излучении и динамические спектры микроволнового излучения. Рисунок 1, б представляет составной динамический спектр, полученный по данным NoRP и БШМС.

Во время вспышки наблюдались два основных широкополосных (от 2 до 16 ГГц) всплеска и между ними узкополосные всплески с шириной спектра от 2 до 4 ГГц (см. рис. 1, в). Первый короткий пик на рис. 1, в мы исключили из рассмотрения, поскольку он оказался длительностью более 1 с и не являлся узкополосным: его ширина более 4 ГГц, что хорошо видно на спектре. В данной работе анализируются субсекундные всплески в 30-секундном интервале (02:36:40–02:37:10 UT), ограниченном на панелях вертикальными штрихпунктирными линиями. В этом интервале на трех частотах ширина полосы излучения субсекундных всплесков сравнима с разницей их частот — около 2 ГГц.

На рис. 2, а приведены временные профили на частоте 5.744 ГГц с разрешением 10 мс, полученные из динамического профиля БШМС во время вспышки.

Выделяются два основных всплеска и тонкая временная структура между ними. Рисунок 2, б демонстрирует профили интенсивности для интервала с ССИ с временным разрешением 14 мс, зарегистрированные ССРТ на частоте 5.7 ГГц.

Изображения области энерговыделения и контуры всплещных источников показаны на рис. 3. Микроволновое излучение фонового всплеска на частоте 5.7 ГГц (белые контуры) покрывает яркие КУФ-петли (131 Å). Компактный источник излучения на 17 ГГц (розовые контуры) находится вблизи центра яркости источника на 5.7 ГГц. Данные в жестком рентгеновском излучении в каналах 6–12 кэВ (красные контуры) и 12–25 кэВ (фиолетовые контуры) показывают большую низкую петлю, ориентированную вдоль множества КУФ-петель. Основания КУФ-петель разнесены по широте и находятся в областях мелких пор и пятен отрицательной полярности на востоке и положительной полярности на западе (см. рис. 3, б).

Данные ССРТ позволяют локализовать источники ССИ относительно центра яркости фонового всплеска [Meshalkina et al., 2004]. В нашем событии центры яркости источников ССИ появлялись в области, обведенной голубой рамкой на рис. 3, б и 4. Для количественной оценки величин смещений были использованы центры «тяжести» сканов. Видно (рис. 3, а и 4), что область генерации ССИ смещена от центра яркости фонового всплеска примерно на 10" на юго-запад и находится в вершинах петель, видимых в жестком рентгене и КУФ.

Чтобы проанализировать пространственную динамику ярких узлов во время вспышки (см. рис. 4), мы выделили в области вспышки четыре фрагмента изображения.

Примечательно, что яркие узлы наблюдались в разных каналах AIA/SDO (171, 193, 304 Å). Последовательности изображений в линии 171 Å, которая соответствует температуре активных областей в короне 0.6 МК, показаны на рис. 5. На изображениях видны яркие точки размерами до 5".

Динамика ярких узлов на протяжении всей вспышки в крайнем ультрафиолете в канале 335 Å (AIA/SDO) представлена в фильме [[http://ru.iszf.irk.ru/~nata/120906/335\\_blue.mp4](http://ru.iszf.irk.ru/~nata/120906/335_blue.mp4)]. Согласно рис. 4, область с источниками ССИ охватывает все четыре выделенных фрагмента. Яркие узлы то появляются внутри этих фрагментов, то исчезают, двигаются в разных направлениях. Возможности слежения за движением ярких узлов ограничиваются временным разрешением КУФ-изображений 12 с.

На рис. 6 представлен временной ход интегрального потока УФ в канале 335 Å, рассчитанного по четырем фрагментам. Видно, что отчетливо выраженное повышение потока во втором и третьем фрагментах соответствует по времени интервалу с ССИ. Для остальных фрагментов не наблюдается такого однозначного соответствия.

На рис. 7 представлены временные профили в радио- и рентгеновском излучении.

В канале 25–50 кэВ Fermi с разрешением 64 мс мы наблюдаем короткие импульсы, данные RHESSI с временным разрешением 100 мс уже не показывают

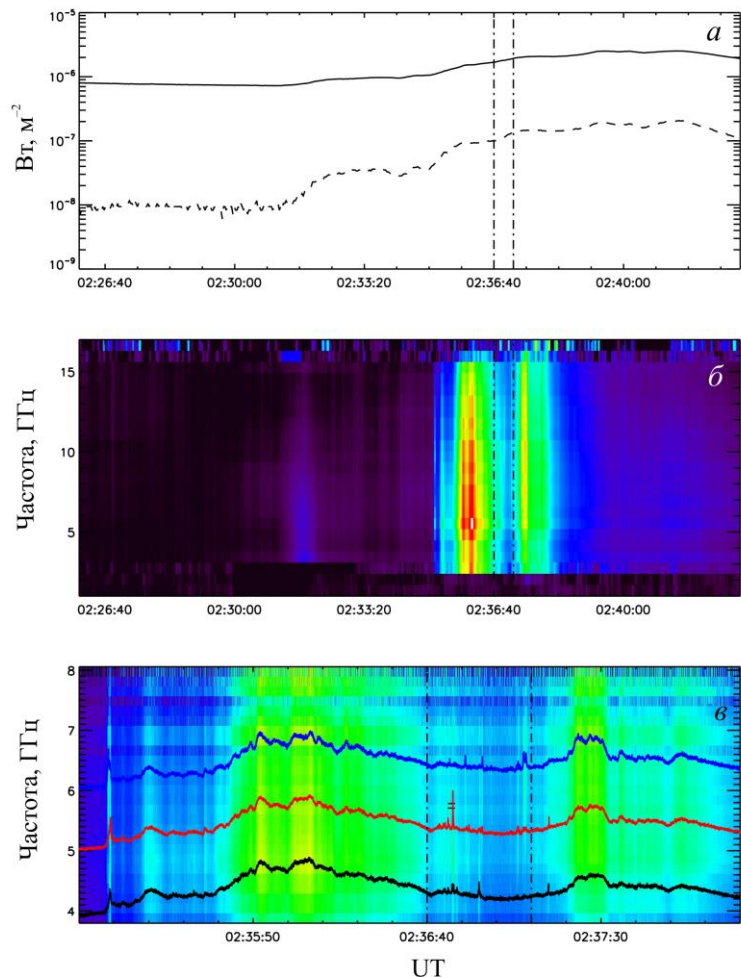


Рис. 1. Событие 6 сентября 2012 г.: *a* — данные GOES, потоки излучения 1–8 Å (сплошная кривая) и 0.5–4 Å (штриховая кривая); *б* — составной динамический спектр в микроволновом диапазоне, полученный по данным NoRP и БШМС; *в* — динамический спектр БШМС с отдельно выделенными профилями на частотах 4.07, 5.03 и 6.07 ГГц. Вертикальные штрихпунктирные линии отмечают интервал с тонкой временной структурой

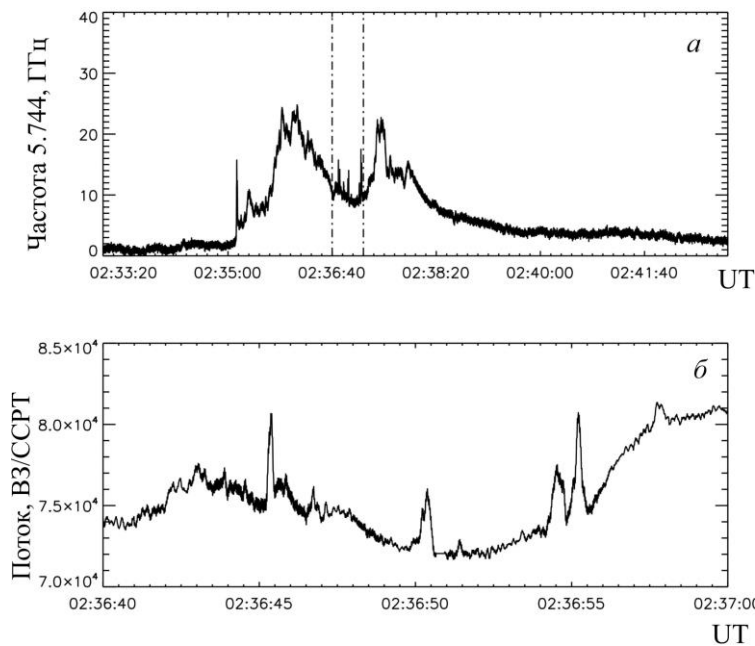


Рис. 2. Временной профиль интенсивности на частоте 5.744 ГГц, полученный из динамического профиля БШМС, вертикальные штрихпунктирные линии отмечают интервал с ССИ (*a*); временные профили потока радиоизлучения в интервале времени с ССИ, полученные ССРТ (*б*)



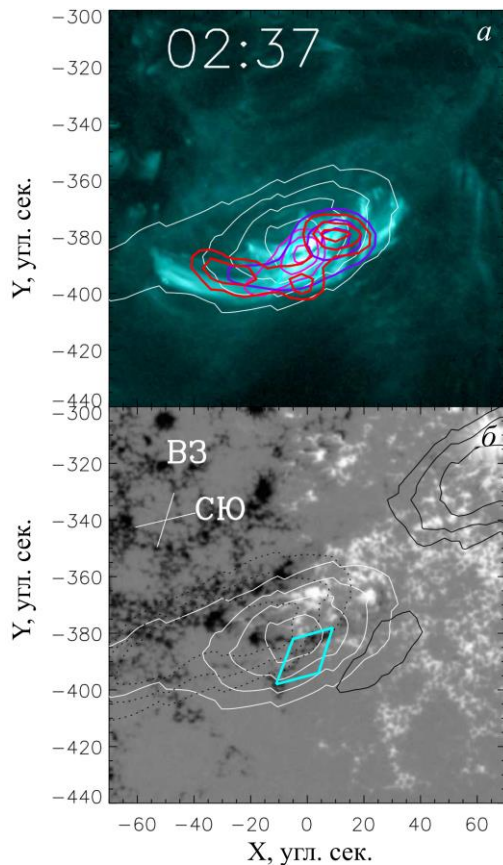


Рис. 3. Изображение в канале  $131 \text{ \AA}$  (AIA/SDO) в 02:35:10 UT с наложенными контурами (а): белые контуры — распределение яркостной температуры (изображение на частоте  $5.7 \text{ ГГц}$  в 02:37 UT) на уровнях 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 от ее максимума; розовые — распределение яркостной температуры в интенсивности (уровни 0.5, 0.7, 0.9 от максимума) на  $17 \text{ ГГц}$  в 02:37; фиолетовые и красные — данные RHESSI в каналах 12–25 и 6–12 кэВ (уровни 0.2, 0.5, 0.8 от максимума). Голубой рамкой на этой и следующей панелях обведено местоположение источников ССИ.

Магнитограмма HMI/SDO в 02:37:06 с наложенными контурами (б): белые контуры — распределение яркостной температуры в интенсивности (уровни 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 от максимума) на частоте  $5.7 \text{ ГГц}$  (ССРТ); черные — распределение яркостной температуры в круговой поляризации на частоте  $5.7 \text{ ГГц}$ : сплошные — правая поляризация (уровни 0.5, 0.7, 0.9 от максимума); пунктирные — левая (уровни 0.5, 0.7, 0.9 от минимума). Белый крест в верхнем левом углу — диаграмма направленности ССРТ

тонкой структуры, а демонстрируют только два основных всплеска вследствие низкой чувствительности. Во время наблюдения группы ССИ, зарегистрированной в радиоизлучении, мы не наблюдаем отклика в рентгеновском излучении на обоих инструментах. На рис. 7, з, д присутствуют два широкополосных основных всплеска в радиоизлучении, имеющих некогерентную природу.

## ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 на спектре, полученном на БШМС, и временных профилях тонкая временная структура наблюдается в интервале между двумя основными всплесками, видимыми в радио- и жестком рентгеновском диапазонах. Ширина полосы спектра этих

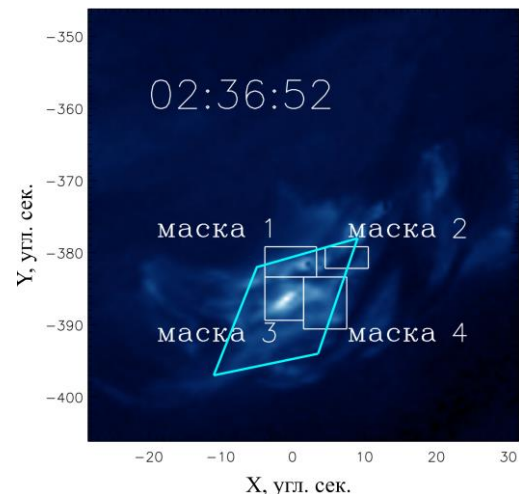


Рис. 4. Яркие узлы по УФ-данным AIA/SDO в канале  $335 \text{ \AA}$  в 02:36:52 UT. Места появления источников ССИ обведены голубой рамкой (как и на рис. 3)

ССИ составляла от 2 до  $4 \text{ ГГц}$ . В отличие от всплесков с шириной полосы более  $4 \text{ ГГц}$ , узкополосные ССИ генерируются когерентным механизмом. Ранее нами было показано, что микроволновое когерентное излучение на частотах приема ССРТ генерируется плазменными механизмами около удвоенной ленгмюровской частоты электронами с энергиями несколько десятков килоэлектронвольт (обзор [Алтынцев и др., 2023] и ссылки в этой работе).

Из наблюдений на ССРТ следует, что узкополосные субсекундные всплески генерируются в области вспыхивающих петель, в которой в это время появлялись яркие КУФ-узлы. Для того чтобы они могли быть источниками плазменного излучения на частоте  $5.7 \text{ ГГц}$ , плотность плазмы в них должна достигать  $10^{11} \text{ см}^{-3}$ .

Плотность плазмы можно оценить с помощью меры эмиссии ультрафиолетового излучения  $EM = \int DEM(T_{\log}) dT_{\log}$ , где  $DEM$  — дифференциальная мера эмиссии,  $T_{\log} = \lg(T)$ . Дифференциальная мера эмиссии и погрешности решения были получены с помощью метода инверсии [Cheng et al., 2012], единицы измерения  $[\text{см}^{-5} \text{ K}^{-1}]$ . Входными данными являются SDO/AIA-изображения в ультрафиолетовом излучении в шести каналах (94, 131, 171, 193, 211 и  $335 \text{ \AA}$ ) для 02:37 UT. В это время зависимость  $DEM$  от температуры имела один максимум на низких температурах  $0.3 \text{ MK}$  (что соответствует пику радиационных потерь оптически тонкой плазмы) и второй широкий максимум при  $T \approx 2.5 \text{ MK}$  (рис. 8).

Концентрацию электронов можно оценить как  $n_e = \sqrt{EM/l}$ , где  $l$  — толщина излучающей области по лучу зрения. Мы нашли в области яркой точки (на рис. 9 она обведена белой рамкой) при  $l = 1.74 \times 10^8 \text{ см}$  (поперечный размер яркого узла четыре пиксела, пиксел AIA равен  $0.6''$ ) максимальное значение плотности  $n_e \approx 9 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Таким образом, плотность плазмы в источнике достаточна для генерации гармоника плазменной частоты в узле. Механизм генерации электромагнитной волны на частоте около удвоенной плазменной рассмотрен во многих работах

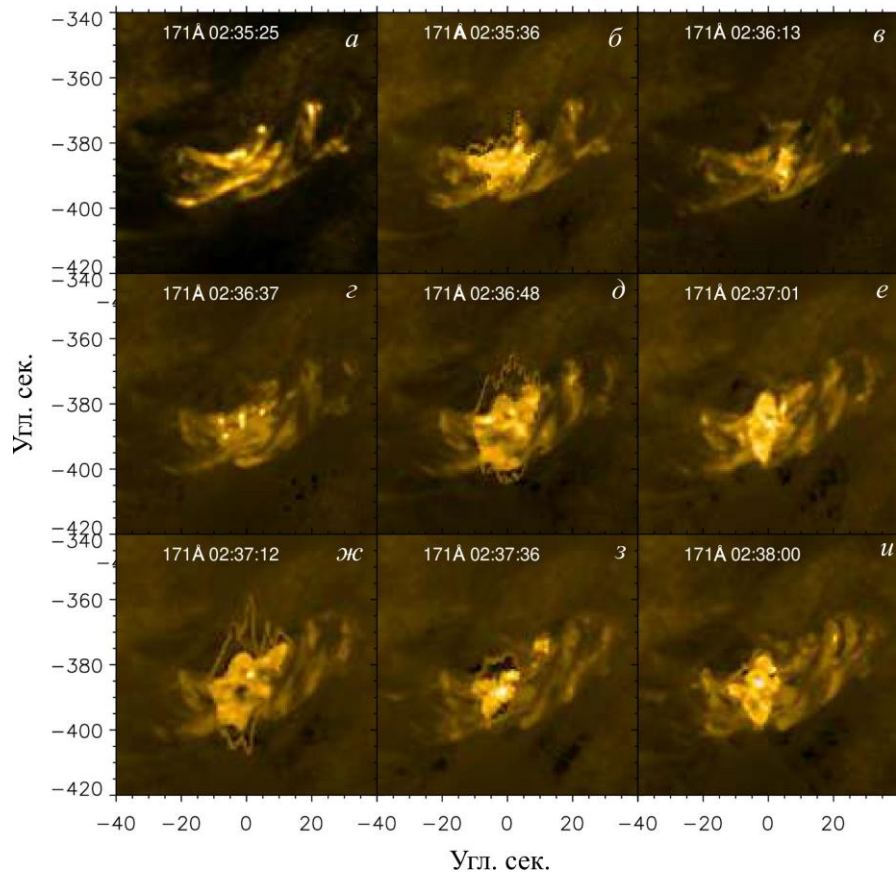


Рис. 5. Яркие узлы по УФ-данным AIA/SDO в канале 171 Å в течение всей вспышки; д и е — изображения во время ССИ

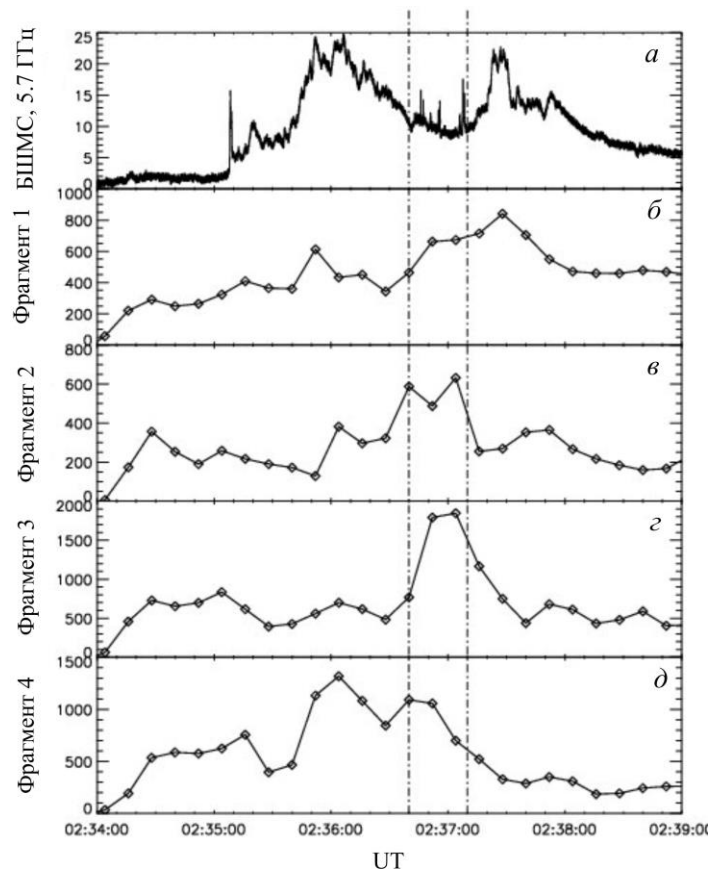


Рис. 6. Временные профили потока КУФ-излучения в канале 335 Å, рассчитанного по четырем фрагментам (маскам) на рис. 4

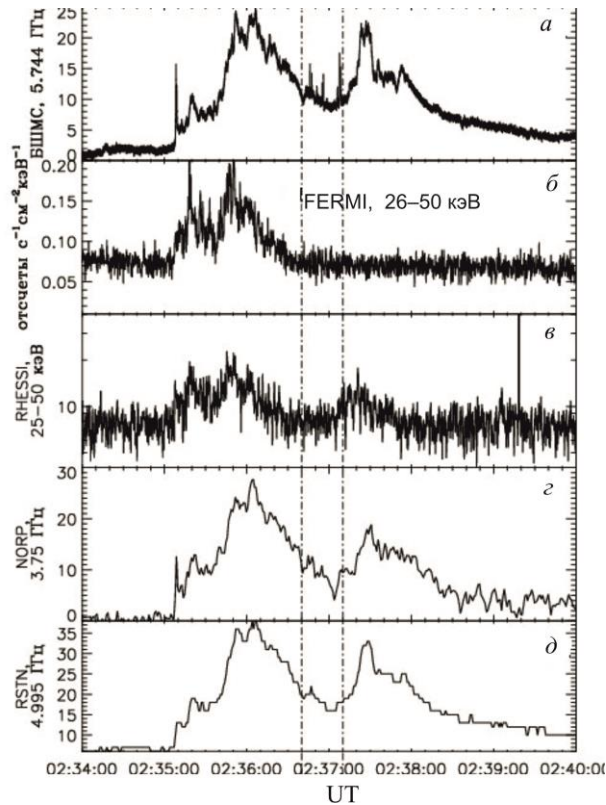


Рис. 7. Временные профили в микроволновом и жестком рентгеновском излучении: *a* — данные БШМС на частоте 5.744 ГГц; *б* — Fermi/GBM; *в* — RHESSI 25–50 кэВ; *г* — NoRP; *д* — RSTN

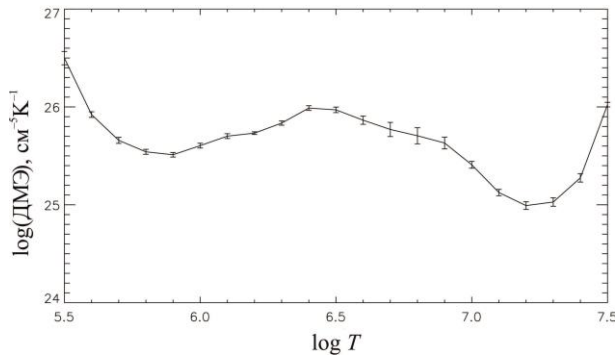


Рис. 8. Дифференциальная мера эмиссии, рассчитанная для 02:37 UT. Барями нанесены погрешности в измерениях (три стандартных отклонения)

(см., например, [Benz et al., 1992]). Вне узла плотность плазмы резко падает — в несколько раз на расстояниях около угловой секунды, что, во-первых, ограничивает источник ССИ на частоте 5.7 ГГц размерами яркого КУФ-узла и, во-вторых, создает благоприятные условия для выхода излучения ССИ из яркого узла.

Столкновительное поглощение в нижней короне существенно влияет на возможность наблюдений микроволновых субсекундных импульсов. В работе [Benz et al., 1992] сделан вывод, что в случае магнитной трубки, заполненной плотной плазмой, излучение ССИ может наблюдаться, если оно выходит к наблюдателю поперек магнитной трубки и отрицательный градиент плотности плазмы в этом направлении достаточно велик. Нами было показано ранее

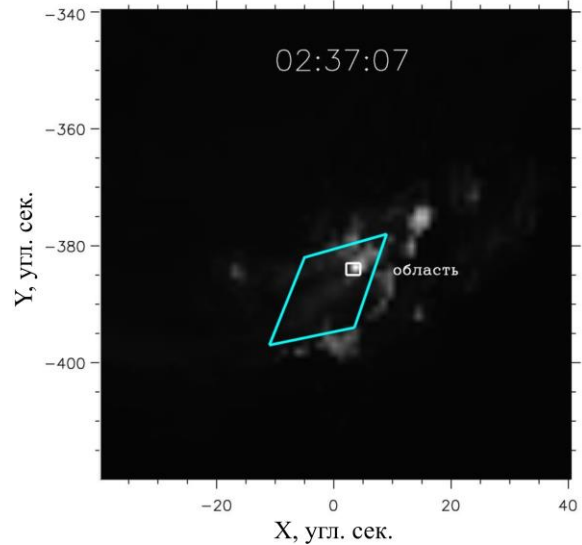


Рис. 9. Фон — мера эмиссии. Белой рамкой отмечена область, в которой была оценена плотность электронов. Голубой рамкой, как и на рис. 3, 4, отмечено местоположение ССИ

[Meshalkina et al., 2004], что источники ССИ наблюдаются чаще в вершинах петель, когда излучение выходит поперек петли.

При излучении на частоте, близкой к двойной ленгмюровской, требуемая концентрация плазмы меньше в четыре раза (на частоте 5.7 ГГц концентрация во вспышечной петле  $10^{11} \text{ см}^{-3}$ ), чем для фундаментальной частоты. Поглощение в окружающей источник плазме падает в этом случае на порядок. Оценка величины поглощения при излучении второй гармоники плазменной частоты приведена в работе [Benz et al., 1992]:

$$\tau = \begin{Bmatrix} 46 \\ 1.2 \end{Bmatrix} T^{-3/2} \nu^2 H_r, \quad (1)$$

где  $T$  — температура в петле [К];  $\nu$  — частота [ГГц];  $H_r$  — масштаб изменения плотности [см]. В нашем случае при частоте 5.7 ГГц и  $T=2.5 \text{ МК}$  получаем  $H_r=1000 \text{ км}$ . Таким образом, условия выхода излучения для узлов размерами несколько угловых секунд выполняются.

Относительно высокая температура и повышенная относительно окружения концентрация плазмы, а также присутствие нетепловых электронов, генерирующих плазменное излучение, свидетельствуют в пользу интерпретации ярких ультрафиолетовых узлов как локальных мест энерговыделения. Такой сценарий образования ярких узлов был предположен в работах [Tsuneta et al., 1991; Shimizu et al., 1994; Doschek et al., 1995; Warren, 2000]. Следует отметить, что на локализацию источников ССИ в области первичного энерговыделения солнечных вспышек указывалось нами в работе [Алтынцев и др., 2023] (см. также ссылки в ней).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во вспышке 06.09.2012 тонкая временная структура наблюдалась во время появления движущихся



ярких УФ-узлов. Источники ССИ наблюдались в ярких плотных ( $10^{11} \text{ см}^{-3}$ ) и компактных (3–5") ультрафиолетовых узлах корональных петель, что обеспечивало благоприятные условия выхода плазменного излучения в наблюдаемом на ССРТ микроволновом диапазоне. Появление импульсов нетепловых электронов указывает, что яркие узлы являются местами быстрого энерговыделения.

Рентгеновские данные показали корреляцию с микроволнами только для двух основных всплесков и не продемонстрировали отклика на тонкую структуру во время вспышки вследствие разных механизмов радио- и рентгеновского излучения, а также, возможно, из-за низкой чувствительности и недостаточного временного разрешения рентгеновских телескопов Fermi и RHESSI. Именно наблюдения когерентного микроволнового излучения обладают высоким диагностическим потенциалом для обнаружения ускорительных процессов в слабых вспышках.

Авторы благодарны анонимному рецензенту и Ю.Т. Цапу за замечания, которые значительно улучшили статью. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Авторы благодарны Жданову Д.А. за помощь в подготовке данных БШМС. Благодарим также команды Солнечной динамической обсерватории, GOES, обсерватории Нобеймы, RHESSI, Fermi, RSTN, Радиоастрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН за предоставленные данные. Результаты получены с использованием Уникальной научной установки «Сибирский солнечный радиотелескоп» [<http://ckp-rf.ru/usu/73606/>] и оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-angara.iszf.irk.ru/>].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алтынцев А.Т., Мешалкина Н.С., Лесовой С.В., Жданов Д.А. Субсекундные импульсы в микроволновом излучении Солнца. *Успехи физических наук*. 2023. Т. 193, вып. 7. С. 737–750. DOI: [10.3367/UFNr.2022.06.039205](https://doi.org/10.3367/UFNr.2022.06.039205).
- Флейшман Г.Д., Мельников В.Ф. Миллисекундные солнечные радиоспайки. *Успехи физических наук*. 1998. Т. 168, вып. 12. С. 1265–1301. DOI: [10.3367/UFNr.0168.199812a.1265](https://doi.org/10.3367/UFNr.0168.199812a.1265).
- Altyntsev A.T., Kuznetsov A.A., Meshalkina N.S., Yihua Y. On the origin of microwave type U-bursts. *Astron. Astrophys.* 2003. Vol. 411. P. 263. DOI: [10.1051/0004-6361:20031273](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20031273).
- Altyntsev A.T., Grechnev V.V., Meshalkina N.S., Yihua Y. Microwave type III-like bursts as possible signatures of magnetic reconnection. *Solar Phys.* 2007. Vol. 242. P. 111–123. DOI: [10.1007/s11207-007-0207-9](https://doi.org/10.1007/s11207-007-0207-9).
- Altyntsev A.T., Meshalkina N.S., Lysenko A.L., Fleishman G.D. Rapid variability in the SOL2011-08-04 flare: Implications for electron acceleration. *Astrophys. J.* 2019. Vol. 883, 338. DOI: [10.3847/1538-4357/ab3808](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab3808).
- Atwood W.B., Abdo A.A., Ackermann M., et al. The Large Area Telescope on the Fermi Gamma-Ray Space Telescope Mission. *Astrophys. J.* 2009. Vol. 697. P. 1071–1102. DOI: [10.1088/0004-637X/697/2/1071](https://doi.org/10.1088/0004-637X/697/2/1071).
- Benz A.O. Millisecond radio spikes. *Solar Phys.* 1986. Vol. 104, no. 1. P. 99–110. DOI: [10.1007/BF00159950](https://doi.org/10.1007/BF00159950).
- Benz A.O., Magun A., Stehling W., Su H. Electron beams in the low corona. *Solar Phys.* 1992. Vol. 141. P. 335–346. DOI: [10.1007/BF00155184](https://doi.org/10.1007/BF00155184).
- Cheng C.C. Spatial distribution of XUV emission and density in a loop prominence. *Solar Phys.* 1980. Vol. 65, iss. 2. P. 347–356. DOI: [10.1007/BF00152798](https://doi.org/10.1007/BF00152798).

- Cheng X., Zhang J., Saar S.H., Ding M.D. Differential emission measure analysis of multiple structural components of coronal mass ejections in the inner corona. *Astrophys. J.* 2012. Vol. 761, no. 1, 62. DOI: [10.1088/0004-637X/761/1/62](https://doi.org/10.1088/0004-637X/761/1/62).
- Doschek G.A., Strong K.T., Tsuneta S. The bright knots at the tops of soft X-ray loops: Quantitative results from YOHKOH. *Astrophys. J.* 1995. Vol. 440. P. 370. DOI: [10.1086/175279](https://doi.org/10.1086/175279).
- Golub L., Bookbinder J., DeLuca E., et al. A new view of the solar corona from the Transition Region And Coronal Explorer (TRACE). *Physics of Plasmas*. 1999. Vol. 6, iss. 5. P. 2205–2216. DOI: [10.1063/1.873473](https://doi.org/10.1063/1.873473).
- Grechnev V.V., Lesovoi S.V., Smolkov G.Ya., et al. The Siberian Solar Radio Telescope: The current state of the instrument, observations, and data. *Solar Phys.* 2003. Vol. 216. P. 239–272. DOI: [10.1023/A:1026153410061](https://doi.org/10.1023/A:1026153410061).
- Guidice D.A., Cliver E.W., Barron W.R., Kahler S. The Air Force RSTN System. *Bull. of the American Astronomical Soc.* 1981. Vol. 13. P. 553.
- Handy B.N., Acton L.W., Kankelborg C.C., et al. The Transition Region And Coronal Explorer. *Solar Phys.* 1999. Vol. 187. P. 229–260. DOI: [10.1023/A:1005166902804](https://doi.org/10.1023/A:1005166902804).
- Kochanov A.A., Anfinogentov S.A., Prosovetsky D.V., et al. Imaging of the solar atmosphere by the Siberian Solar Radio Telescope at 5.7 GHz with an enhanced dynamic range. *Publ. Astron. Soc. Japan*. 2013. Vol. 65, no. SP1, article id. S19. DOI: [10.1093/pasj/65.sp1.S19](https://doi.org/10.1093/pasj/65.sp1.S19).
- Kořománski S., Mrozek T., Chmielewska E. Fine structure and long duration of a flare coronal X-ray source with RHESSI and SDO/AIA data. *arXiv:1701.09127*. 2017. DOI: [10.48550/arXiv.1701.09127](https://doi.org/10.48550/arXiv.1701.09127).
- Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J., et al. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.* 2012. Vol. 275, no. 1-2. P. 17–40. DOI: [10.1007/s11207-011-9776-8](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9776-8).
- Lin R.P., Schwartz R.A., Kane S.R., et al. Solar hard X-ray microflares. *Astrophys. J.* 1984. Vol. 283. P. 421–425. DOI: [10.1086/162321](https://doi.org/10.1086/162321).
- Lin R.P., Dennis B.R., Hurford G.J., et al. The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI). *Solar Phys.* 2002. Vol. 210. P. 3–32. DOI: [10.1023/A:1022428188870](https://doi.org/10.1023/A:1022428188870).
- Meegan C., Lichti G., Bhat P.N., et al. The Fermi Gamma-ray Burst Monitor. *Astrophys. J.* 2009. Vol. 702. P. 791–804. DOI: [10.1088/0004637X/702/1/791](https://doi.org/10.1088/0004637X/702/1/791).
- Meshalkina N.S., Altyntsev A.T., Sych R.A., et al. On the wave mode of subsecond pulses in the cm-range. *Solar Phys.* 2004. Vol. 221. P. 85–99. DOI: [10.1023/B:SOLA.0000033356.96547.65](https://doi.org/10.1023/B:SOLA.0000033356.96547.65).
- Meshalkina N.S., Altyntsev A.T., Zhdanov D.A. Study of flare energy release using events with numerous type III-like bursts in microwaves. *Solar Phys.* 2012. Vol. 280, no. 2. P. 537. DOI: [10.1007/s11207-012-0065-y](https://doi.org/10.1007/s11207-012-0065-y).
- Nakajima H., Nishio M., Enome S., et al. The Nobeyama Radioheliograph. *Proc. IEEE*. 1994. Vol. 82. P. 705.
- Patsourakos S., Antiochos S.K., Klimchuk J.A. A model for bright extreme-ultraviolet knots in solar flare loops. *Astrophys. J.* 2004. Vol. 614, iss. 2. P. 1022. DOI: [10.1086/423779](https://doi.org/10.1086/423779).
- Pesnell W.D., Thompson B.J., Chamberlin P.C. The Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.* 2012. Vol. 275, iss. 1-2. P. 3–15. DOI: [10.1007/s11207-011-9841-3](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9841-3).
- Shimizu T., Tsuneta S., Acton L.W., et al. Morphology of active region transient brightenings with the YOHKOH Soft X-Ray Telescope. *Astrophys. J.* 1994. Vol. 422. P. 906–911. DOI: [10.1086/173782](https://doi.org/10.1086/173782).
- Torii C., Tsukiji Y., Kobayashi S., et al. Full-automatic radiopolarimeters for solar patrol at microwave frequencies. *Proc. of the Research Institute of Atmospheric Sciences*. Nagoya University, 1979. Vol. 26. P. 129–132.
- Tsuneta S., Acton L., Bruner M., et al. The Soft X-ray Telescope for the SOLAR-A mission. *Solar Phys.* 1991. Vol. 136. P. 37–67. DOI: [10.1007/BF00151694](https://doi.org/10.1007/BF00151694).



Warren H.P. Fine structure in solar flares. *Astrophys. J.* Vol. 536, iss. 2. P. L105–L108. DOI: [10.1086/312734](https://doi.org/10.1086/312734).

Widing K., Hiei E. A SKYLAB flare associated with a hard X-ray burst. *Astrophys. J.* 1984. Vol. 281. P. 426. DOI: [10.1086/162113](https://doi.org/10.1086/162113).

Zhdanov D.A., Zandanov V.G. Broadband microwave spectropolarimeter. *Central European Astrophysical Bulletin.* 2011. Vol. 35. P. 223.

Zhdanov D.A., Zandanov V.G. Observations of microwave fine structures by the Badary Broadband Microwave Spectropolarimeter and the Siberian Solar Radio Telescope. *Solar Phys.* 2015. Vol. 290, no. 1. P. 287. DOI: [10.1007/s11207-014-0553-3](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0553-3).

URL: <https://badary.iszf.irk.ru/Ftevents.php> (дата обращения 2 июля 2023 г.).

URL: [http://ru.iszf.irk.ru/~nata/120906/335\\_blue.mp4](http://ru.iszf.irk.ru/~nata/120906/335_blue.mp4) (дата обращения 2 июля 2023 г.).

URL: <http://ckp-rf.ru/usu/73606/> (дата обращения 2 июля 2023 г.).

URL: <http://ckp-angara.iszf.irk.ru/> (дата обращения 2 июля 2023 г.).

*Как цитировать эту статью:*

Мешалкина Н.С., Алтынцев А.Т. Яркие ультрафиолетовые узлы как возможные источники когерентного микроволнового излучения. *Солнечно-земная физика.* 2023. Т. 9, № 4. С. 21–29. DOI: [10.12737/szf-94202302](https://doi.org/10.12737/szf-94202302).