

КОГЕРЕНТНОЕ МИКРОВОЛНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ КАК ИНДИКАТОР НЕТЕПЛОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В РЕНТГЕНОВСКОЙ КОРОНАЛЬНОЙ ТОЧКЕ

COHERENT MICROWAVE EMISSION AS AN INDICATOR OF NON-THERMAL ENERGY RELEASE AT A CORONAL X-RAY POINT

А.Т. Алтынтцев 

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

Н.С. Мешалкина 

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

И.И. Мышьяков 

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

A.T. Altyntsev

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

N.S. Meshalkina

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

I.I. Myshyakov

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

Аннотация. Обнаружен отклик в узкой полосе 5–7 ГГц микроволнового излучения на появление корональной рентгеновской точки. Источник излучения в рентгеновском диапазоне представляет собой короткую петлю, расположенную в хвостовой части активной области и возникающую при пересоединении магнитных полей вблизи оснований высоких и низких петель, укорененных в близких парах противоположной полярности. Мощность энерговыделения мала, и в жестком рентгене генерации горячего компонента плазмы не наблюдалось. С помощью анализа изображений в мягком рентгеновском и крайнем ультрафиолетовом диапазонах показано, что микроволновое излучение имеет когерентную природу и генерируется на частоте около удвоенной плазменной частоты электронами с энергиями выше нескольких десятков килоэлектронвольт. Результат свидетельствует, что наблюдения микроволнового излучения обладают высоким диагностическим потенциалом обнаружения ускорительных процессов в слабых транзиентных событиях. Это следует учитывать при планировании наблюдений на радиогелиографах нового поколения, создаваемых в настоящее время.

Ключевые слова: Солнце, корональные точки, микроволновые всплески, когерентное излучение, струи.

Abstract. A response has been found in a narrow band 5–7 GHz of microwave emission to the appearance of a coronal X-ray point. The emission source is a short X-ray loop located in the tail part of an active region and occurring when magnetic fields are reconnected near the footpoints of high and low loops rooted in nearby magnetic pores of the opposite polarity. The power of energy release is low and no response of the hot plasma component was observed in hard X-rays. Analysis of images in soft X-ray and extreme UV radiation shows that microwave emission has a coherent nature and is generated at a frequency of about twice the plasma frequency by electrons with energies above several tens of keV. The result indicates a high diagnostic potential of microwave observations to detect acceleration processes in weak transitory events and can be useful for observation planning with new generation radioheliographs currently under development.

Keywords: Sun, coronal points, microwave bursts, coherent emission, jets.

ВВЕДЕНИЕ

В солнечных активных областях концентрируются сильные магнитные поля. Эти динамичные сложные магнитные структуры возникают в фотосфере и распространяются в корону, которая является источником экстремальных солнечных событий, таких как солнечные вспышки и корональные выбросы массы. Наряду с мощными вспышками генерируются слабые возмущения различных пространственных и временных масштабов в короне и переходной области. Эти возмущения видны как слабые

урчания в мягком рентгеновском [Lin et al., 1984; Shimizu et al., 1994] и в крайнем ультрафиолетовом (КУФ) диапазонах [Porter et al., 1984; Young et al., 2018]. По наблюдениям всплесков в жестком рентгене была обнаружена генерация нетепловой электронной компоненты в микровспышках [Schadee et al., 1983; Christe et al., 2008; Hannah et al., 2008, 2011; Wright et al., 2017]. Интерес к исследованию событий малой мощности связан с тем, что их совокупность может давать основной вклад в нагрев короны.

В качестве основных механизмов нагрева короны обсуждаются диссипация магнитных напряжений и диссипация МГД-волн (см., например, обзоры [Aschwanden, 2004; Mandrini et al., 2000; Klimchuk, 2006]). Появление нетеплового излучения естественным образом связано с диссипацией магнитных напряжений, среди механизмов которой выделяются две группы. В первой группе выделение энергии обеспечивается диссипацией токов в слоях, формирующихся в короне за счет взаимодействия между тонкими элементарными петлями или нитями [Parker, 1988; Lopez Fuentes, Klimchuk, 2010]; во второй группе происходит релаксация через джоулев нагрев токов, индуцированных магнитными полями движущихся оснований петель [Gudiksen, Nordlund, 2005; Warnecke, Peter, 2019].

Вместе с данными КУФ и жесткого рентгеновского излучения наблюдения в радиодиапазоне способны дать уникальную информацию о процессах нагрева короны. Во-первых, параметры радиоизлучения зависят от магнитного поля в источнике, и, во-вторых, радионаблюдения более чувствительны к появлению нетепловых электронов [Benz, 1986; Gopalswamy et al., 1997; Флейшман, Мельников, 1998; Altyntsev et al., 2012]. Давно замечено, что в активных областях, наряду с гирорезонансным излучением тепловой плазмы над солнечными пятнами с сильными магнитными полями, наблюдается микроволновое излучение, генерируемое другими механизмами. Первые признаки нетеплового излучения наблюдались на Westerbork Synthesis Radio Telescope на частоте 5 ГГц во время формирования пятен в активных областях [Shibasaki et al., 1983; Chiuderi Drago et al., 1987]. На частоте 5.7 ГГц отмечалась реакция на появление солнечных пятен при наблюдениях на Сибирском солнечном радиотелескопе (ССРТ). Было установлено, что во многих случаях на плавный рост радиоизлучения накладываются всплески длительностью ~20 мин и амплитудой менее 1 с.е.п. [Nefed'ev et al., 1993; Myachin et al., 1999]. Тормозное излучение как механизм излучения всплесков было впервые предложено White et al. [1995] на основе оценок температуры и меры эмиссии мягкого рентгеновского излучения.

Наблюдения на VLA на частотах 8.3 и 15 ГГц подтвердили, что помимо теплового гирорезонансного и тормозного излучения наблюдаются всплески нетеплового излучения, синхронные с рентгеновскими микровспышками [Gopalswamy et al., 1997]. Длительности слабых микроволновых всплесков (кратковременных микроволновых уярчений или ярких корональных точек) составляли 1–10 мин, а амплитуды потоков иногда были меньше 0.025 с.е.п. Авторы предложили сценарий, в котором всплески были вызваны нагревом или ускорением частиц в компактных магнитных петлях. Наблюдения слабых микроволновых всплесков в широком спектральном диапазоне были выполнены в радиообсерватории OVSA [Gary et al., 1997; Nindos et al., 1999]. Наблюдения нескольких десятков микровспышек, зарегистрированных на радиогелиографе Нобейма (NoRH), обсуждались в работе [Kundu et al., 2006]. В недавней работе [Altyntsev et al., 2020] изучались слабые

процессы энерговыделения в короне над изолированной активной областью. Они проявляли себя как квазистационарное увеличение микроволнового и мягкого рентгеновского излучения, сопровождаемое серией микровспышек классов В и С. Многоволновые микроволновые наблюдения позволили выделить на фоне теплового тормозного излучения микровспышек импульсную нетепловую компоненту на частотах ниже 6 ГГц.

В этой работе мы обсуждаем необычно узкополосное микроволновое излучение яркой корональной рентгеновской точки, связанной с корональной плазменной струей, наблюдавшейся 13 апреля 2019 г. в АО 12738.

ИНСТРУМЕНТЫ И МЕТОДЫ

Локализация источников микроволнового излучения проводилась с помощью 48-антенного прототипа Сибирского радиогелиографа (СРГ-48) на пяти частотах (4.5, 5.2, 6.0, 6.8 и 7.5 ГГц) со скважностью 8.4 с [Lesovoi et al., 2014, Лесовой и др., 2017]. Ширина диаграммы направленности СРГ составляла до 100° и изменялась обратно пропорционально частоте. Для измерения спектра использовались данные расположенного в Бадарах широкополосного микроволнового спектрополяриметра (Badary Broadband Microwave Spectropolarimeter, BBMS) [Zhdanov, Zandanov, 2011] с диапазоном принимаемых частот 4–8 ГГц. Последовательности изображений, полученные с помощью NoRH на частоте 17 ГГц [Nakajima et al., 1994], использовались для изучения пространственного распределения и вариаций интенсивности излучения. Пространственное разрешение достигало 10".

Для локализации источников мягкого рентгеновского излучения использовались данные рентгеновского телескопа X-ray Telescope (XRT) спутника Hinode [Kosugi et al., 2007]. XRT чувствителен в диапазоне энергий от ~0.15 до более 3 кэВ и может регистрировать излучение плазмы температурой от ~1 МК до нескольких десятков мегакальвинов. Данные о спектральных и пространственных характеристиках КУФ-излучения были получены Solar Dynamic Observatory (SDO) [Pesnell et al., 2012]. Использовались изображения полного солнечного диска с разрешением 0.6", записываемые каждые 12 с (AIA) [Lemen et al., 2012]. Шесть каналов КУФ SDO/AIA (171, 193, 211, 131, 335 и 94 Å) использовались для расчета мер эмиссии при температурах $5.5 < \lg T < 7.5$. Дифференциальная мера эмиссии рассчитывалась методом инверсии [Cheng et al., 2012].

Для расчета коронального магнитного поля использовалось приближение потенциального поля на основе функции Грина. Входные граничные условия брались из векторных магнитограмм SDO/HMI (серия В 720s) [Scherrer et al., 2012; Schou et al., 2012]. Пи-неоднозначность устранена методом [Rudenko, Anfinogentov, 2014]. Экстраполяция потенциального поля была выполнена в сферической геометрии для равномерной сетки с разрешением 1 Мм.

АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЙ

Динамический спектр микроволнового излучения, зарегистрированный с помощью BBMS в интер-

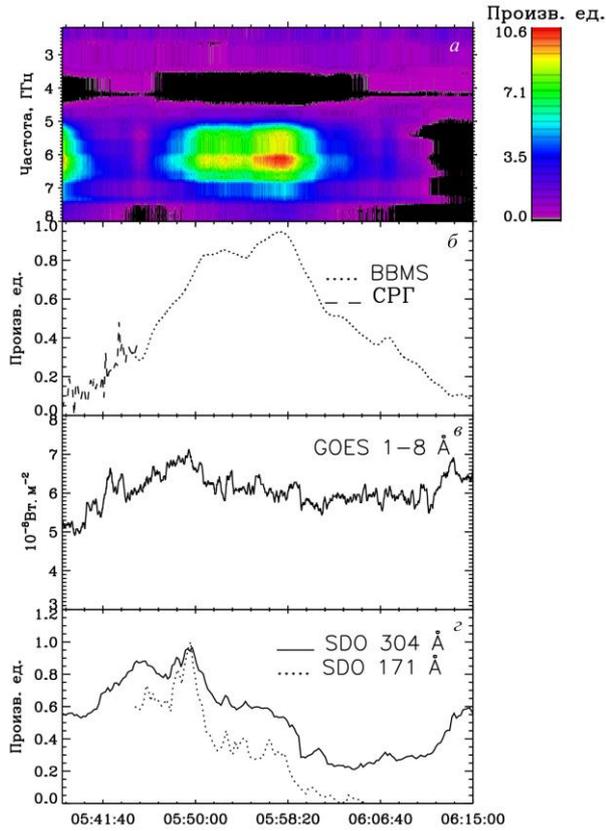


Рис. 1. Динамический спектр в микроволновом диапазоне, записанный BBMS 13 апреля 2019 г. (а); нормализованный поток на 6 ГГц по данным BBMS и корреляционная кривая CRG до 05:45:15 (б); данные GOES, сглаженные с окном 10 с (в); потоки КУФ на 304 и 171 Å (SDO/AIA), вычисленные по области, выделенной пунктирной рамкой на рис. 2, а (г)

вале 05:43:30–06:15:00 UT (далее также используется всемирное время), показан на рис. 1. Видна полоса усиленного излучения шириной около 2 ГГц вокруг частоты 6 ГГц, на которой максимальный поток достигает 8 с.е.п. Длительность усиления потока составляет около 15 мин. В начале этого интервала наблюдается слабое увеличение потока в мягком рентгеновском канале GOES. В жестком рентгеновском канале GOES и на Fermi Gamma-ray Burst Monitor [Meegan et al., 2009] увеличение потока не наблюдается.

В рассматриваемый интервал времени на солнечном диске находится одна активная область AO 12738. Магнитная структура активной области состоит из крупного лидирующего солнечного пятна S-полярности и группы небольших магнитных пятен различных знаков, распределенных по хвостовой части (рис. 2, а). Во время уярчения микроволнового излучения на рис. 1, а на изображении в мягком рентгене XRT/Hinode появляется яркое пятно, которое представляет собой короткую яркую петлю А, отмеченную стрелкой на рис. 2. Позднее, как показано в верхнем правом углу рис. 2, а, яркое пятно в этом месте исчезает. Расстояние между основаниями петли А около 20'' при ее ширине до 4''. Пунктирная рамка отмечает границы изображений б, в. Временная зависимость потока на 304 Å, просуммированного по этому кадру (см. рис. 1, г), показывает одно-

временное усиление интенсивности КУФ и мягкого рентгеновского излучения.

Наблюдения CRG были доступны до 05:45:15. Микроволновые источники на частоте, близкой к 6 ГГц, показаны белыми контурами на рис. 2, б. Контурами показаны источники на последнем по времени регистрации изображении на частоте 5.1 ГГц, записанном с помощью CRG-48 в 05:44:51 в начале роста микроволнового излучения. Контуры охватывают ведущее южное пятно и яркие структуры на изображении на длине волны 193 Å, включая петлю А. Диаграмма CRG-48 (овал в нижнем левом углу рис. 2, б) слишком велика для точной локализации слабого источника микроволнового излучения. Более высокое пространственное разрешение обеспечивается при наблюдениях в КУФ и микроволновом диапазоне на частоте 17 ГГц (рис. 2, в). Источник А слабо виден на распределении яркостной температуры на 17 ГГц (синие контуры), но он самый яркий на разностной карте (желтые контуры). В источнике А яркостная температура увеличилась с $14 \cdot 10^3$ до $18.5 \cdot 10^3$ К. Аналогичная картина с максимумом яркости в петле А наблюдается на разностных картах меры эмиссии, рассчитанной по КУФ-изображениям.

Разностная карта в линии 193 Å показана на рис. 3, а. Видно, что вблизи области А находятся северо-восточные подножия ярких коротких петель, которые наблюдаются на разных длинах волн SDO/AIA. Анализ карт показал, что эти петли несколько раз формируют выбросы, модулируя яркость КУФ-излучения. Соответствующие пики видны на кривой блеска 304 Å на рис. 1, г, которая представляет профиль потока КУФ из области, отмеченной точечной рамкой на рис. 2, а и черной сплошной рамкой на рис. 3, а. Выброс показан подробнее на рис. 3, б, где видна эруптивная петля с закручиванием в вершине.

Можно оценить параметры плазмы в месте энерговыделения с помощью дифференциальной меры эмиссии (ДМЭ). Кривые ДМЭ, рассчитанные в минимуме и максимуме потока 304 Å для области, ограниченной рамкой на рис. 2, б, представлены на рис. 4, а. Температура плазмы $T=1.5-2$ МК, и в обоих случаях не наблюдается горячей составляющей выше 8 МК. При мере эмиссии $EM=2 \cdot 10^{28} \text{ см}^{-5}$ плотность плазмы должна составлять $\sim 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$.

Знание температуры и меры эмиссии позволяет рассчитать яркостную температуру T_{br} теплового тормозного излучения [Zhang et al., 2001]:

$$T_{br} = 0.2 f^{-2} T^{-0.5} EM + T_q,$$

где T_q — температура спокойного солнечного диска на частоте f . На частоте 17 ГГц $T_{br} \approx 20 \cdot 10^4$ К для $T_q = 10^4$ К, что близко к наблюдаемому значению.

Появление нетепловой электронной компоненты следует из наблюдений микроволнового спектра, зарегистрированного с помощью спектрометра BBMS. Спектр в момент максимума профиля на 6 ГГц (05:58) показан на рис. 4, б. Здесь вычтено фоновое излучение в 05:45. Поток достигает ~ 8 с.е.п., а уровень шума составляет около 1–2 с.е.п. Ширина спектра не превышает 2 ГГц. Спектр характеризуется крутым спадом в сторону низких и высоких частот. На частоте

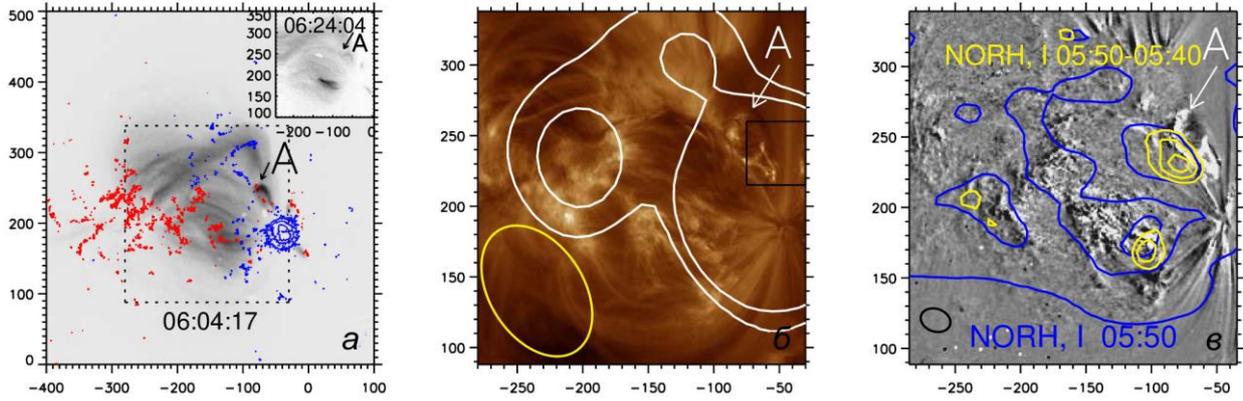


Рис. 2. АО 12635 в мягком рентгеновском излучении (XRT/HiNode) в 06:04 и 06:24 (фрейм в верхнем правом углу) и компоненты магнитного поля по лучу зрения $\pm 100, \pm 300, \pm 1000, \pm 1500$ Гс (а): красные и голубые контуры — положительные и отрицательные компоненты соответственно; пунктирная рамка ограничивает область, показанную на панели б. Изображение на 193 \AA в 05:50 (б): белые контуры — яркостная температура ($6.9 \cdot 10^4, 9.4 \cdot 10^4$ К) на 5.1 ГГц в 05:44:51; желтый овал в нижнем углу — диаграмма направленности СРГ. Разностная карта меры эмиссии в моменты 05:40 и 05:50 (в): голубые контуры — распределение яркостной температуры на изображении на 17 ГГц ; желтые контуры — уровни 0.5, 0.7, 0.9 от максимума разности между изображениями на 17 ГГц в 05:40 и 05:50; черный овал в левом нижнем углу — диаграмма направленности NoRH. Здесь и на рис. 3, 5 координаты даны в угловых секундах от центра солнечного диска

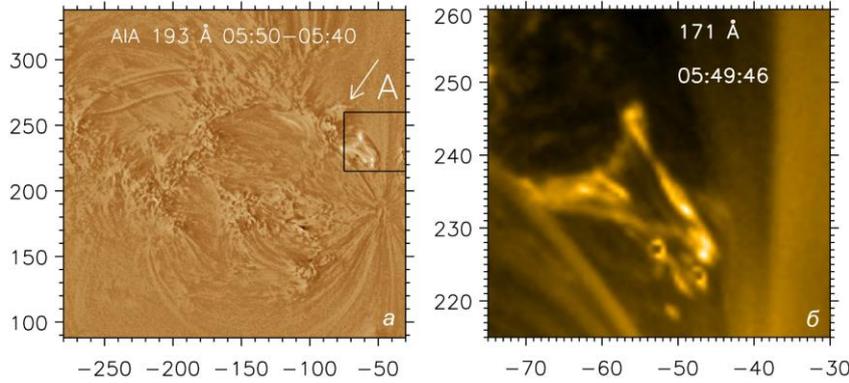


Рис. 3. Разность между изображениями на 193 \AA в 05:40 и 05:50 (а), черная рамка отмечает область, показанную на панели б; эруптивная петля на изображении на 171 \AA (SDO/AIA) в 05:49:46 (б)

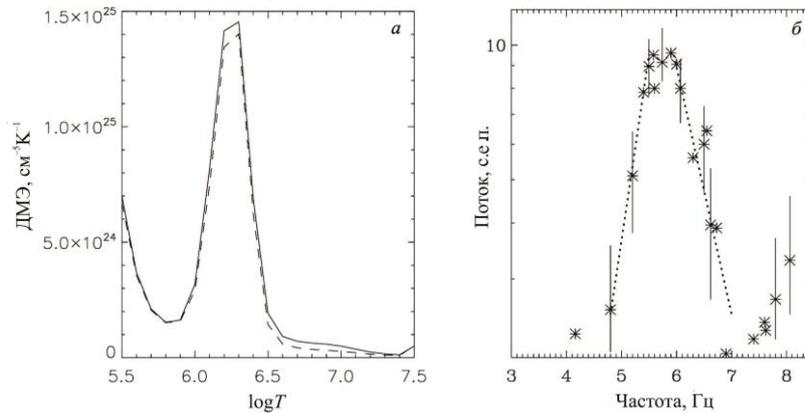


Рис. 4. Дифференциальная мера эмиссии, рассчитанная для моментов перед всплеском (05:40) и в максимуме (05:50) профиля на 304 \AA (а); разность микроволновых спектров, построенных для 05:45 и 05:58 (б). Вертикальные метки показывают уровень шума на кривых потока

тах выше 7.5 ГГц амплитуда спектра снова растет, но измерения на этих частотах ненадежны.

ОБСУЖДЕНИЕ

Целью данной работы является поиск признаков нестеплового энерговыделения в слабых транзитных

событиях. Нами был обнаружен интервал длительностью около 15 мин, в котором наблюдалось узкополосное микроволновое излучение с потоком до 8 с.е.п. на 6 ГГц во время существования рентгеновской корональной точки А. Особенность этой области следует из расчетов нейтральной линии радиальной компоненты магнитного поля в четырех

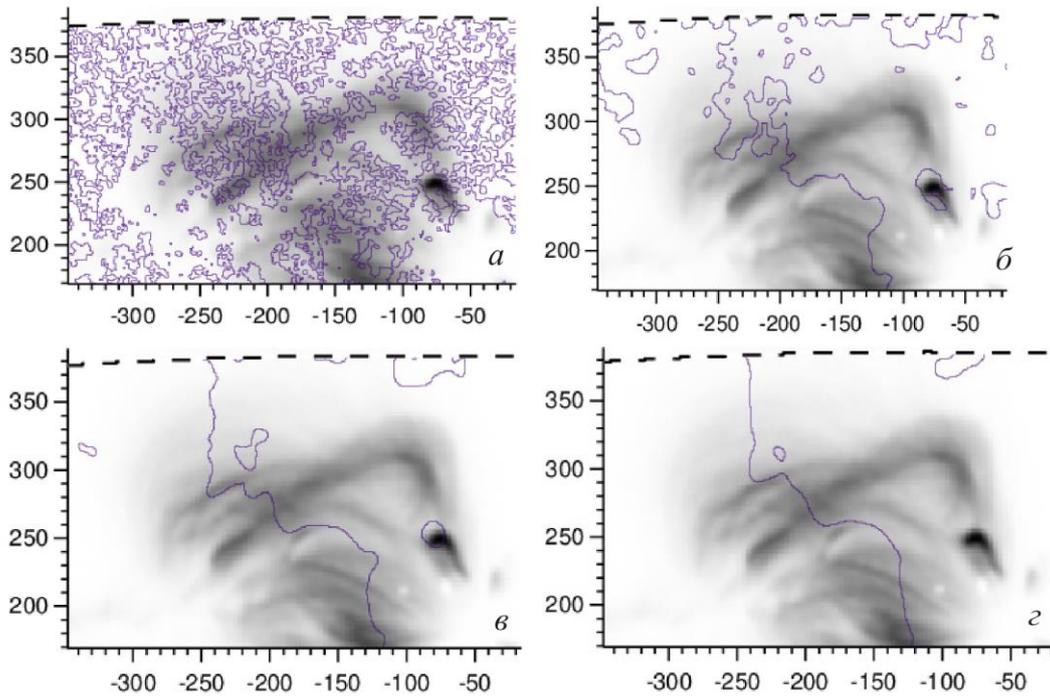


Рис. 5. Реконструкция нейтральных линий радиального магнитного поля (контуры) на различных сферических слоях (*a* — 0; *б* — 3 Мм; *в* — 6 Мм; *г* — 9 Мм) над поверхностью фотосферы. Утолщенная штриховая линия ограничивает вычислительный домен. Фон — изображение XRT/Hinode, повернутое на время 06:04:17

различных сферических слоях над поверхностью фотосферы (рис. 5). Мелкомасштабное магнитное поле быстро исчезает с высотой (панели *б*, *в*), и остается обширная область отрицательных магнитных полей, включая головное пятно, за исключением компактного пятна положительной полярности около особенности А.

Рентгеновское изображение показывает, что в этом месте близко расположены основания высоких петель с отрицательной полярностью и основание яркой низкой петли с положительной полярностью. Как следует из рис. 5, *г*, высота низкой петли не превышает 9 Мм, на этой высоте положительное вкрапление на картах вертикального поля исчезает. Расчетное значение магнитного поля в низкой петле около 100 Гс. Сценарий эрупции мини-волокон и генерации струй в подобной конфигурации в результате магнитного пересоединения антипараллельных полей вблизи оснований петель был предложен в работах [Shibata et al., 1992; Yokoyma, Shibata, 1995, 1996; Panesar et al., 2017, 2018]. В области первичного пересоединения формируется короткая петля, которую можно идентифицировать с низкой рентгеновской петлей на рис. 5.

В микроволновом излучении на частотах около 6 ГГц отклик на выброс не наблюдался. Поэтому можно считать, что микроволновое излучение генерировалось ускоренными электронами в рентгеновской петле, появляющейся в результате пересоединения. На микроволновых картах на 17 ГГц эта область выделялась яркостью вследствие увеличения тормозного излучения из-за прироста плотности плазмы в петле.

Предполагая, что микроволновый поток в 8 с.е.п. излучается из петли А размерами $4'' \times 20''$, ее яркостную

температуру T_{br} можно оценить как 5×10^7 К на частоте 6 ГГц. Такое высокое значение T_{br} свидетельствует о нетепловом характере микроволнового излучения, поскольку, согласно КУФ-измерениям, температура плазмы в петле не превышает 2 МК. Признаков нагрева плазмы до высоких температур нет также в канале GOES 0.5–4 Å, чувствительном к появлению плазмы с температурой выше 4 МК [Thomas et al., 1985].

В солнечных вспышках высокая яркостная температура микроволнового излучения достигается, как правило, за счет гиротронного излучения слабoreлятивистских электронов в магнитном поле. В нашем случае с этим механизмом не согласуется слишком узкая полоса спектра $\Delta f/f \approx 0.25$. Крутизна спада наблюдаемого спектра на частотах выше максимума дает оценку скорости спада энергетического распределения нетепловых электронов. В случае степенного изотропного спектра показатель наклона должен превышать $\delta \approx 6.5$.

С другой стороны, в нашем случае $f_{pe} \approx 7f_{ce}$, где циклотронная частота $f_{ce} = 2.8 \cdot 10^8$ Гц при магнитном поле в петле 100 Гс, а плазменная частота $f_{pe} = 2 \cdot 10^9$ Гц при $n = 5 \cdot 10^{10}$ см⁻³. В этом случае гиротронное излучение подавляется на несколько порядков из-за эффекта Разина [Ginzburg, Syrovatskii, 1965]. При этом для получения наблюдаемого потока излучения порядка десятка с.е.п. при крутом спаде $\delta \approx 6.5$ необходимо излучение аномально большого количества нетепловых электронов, что противоречит отсутствию откликов в жестком рентгеновском канале GOES и на датчиках рентгеновского спектрометра Ферми.

При условии $f_{pe} \gg f_{ce}$ узкополосное излучение может генерироваться на основной плазменной ча-

стоте или ее гармонике. На частотах выше 3 ГГц доминирует излучение на второй гармонике, на которой столкновительное поглощение электромагнитных волн значительно ниже [Benz et al., 1992; Zaitsev et al., 1997]. Плотность плазмы, необходимая для излучения на 6 ГГц, составляет около 10^{11} см^{-3} , что близко к приведенной выше оценке. Следует отметить ряд работ, в которых когерентное узкополосное излучение, генерируемое нетепловыми электронами на частотах около 6 ГГц, наблюдалось на удвоенной плазменной частоте во время всплесков-спайков III типа [Altyntsev et al., 2007; Meshalkina et al., 2012].

Случаи со стационарным узкополосным излучением наблюдались в дециметровом диапазоне [Zaitsev et al., 1997; Yasnov et al., 2003] и интерпретировались как следствие возбуждения верхнегибридных волн в результате питч-угловой анизотропии нетепловых электронов. Анизотропия конуса потерь устанавливается, когда время релаксации электрона превышает время его пролета по петле. При $n \approx 10^{11} \text{ см}^{-3}$ анизотропия успевает установиться в угловом распределении электронов с энергиями выше десятков килоэлектронвольт [Trubnikov, 1965]. При превышении этой энергии можно также пренебречь релаксацией энергии нетепловых электронов. Возбуждение конусной неустойчивости возможно, если ее инкремент $\gamma \approx 2\pi f_{pe} n_{ac}/n$ (n_{ac} — концентрация электронов с энергией выше 20 кэВ) превышает частоту кулоновских столкновений и скорость нелинейного затухания [Zaitsev, Stepanov, 1983]. Нелинейное затухание зависит в первую очередь от температуры фоновой плазмы и пренебрежимо мало при 2 МК. Частота кулоновских столкновений определяется плотностью и температурой фоновой плазмы и составляет 10^3 с^{-1} . Таким образом, отношение плотностей ускоренных и тепловых электронов должно превышать $3 \cdot 10^{-8}$. Из выражений, полученных в работе [Zaitsev, Stepanov, 1983], следует, что для достижения эффективной радиояркости $\sim 10^8 \text{ К}$ в петле А должно быть $n_{ac}/n \geq 10^{-6}$, и энергосодержание нетепловых электронов мало по сравнению с энергосодержанием фоновой плазмы.

Надо отметить, что процессы магнитного пересоединения и ускорения электронов могут сопровождаться появлением плазменной турбулентности различных типов в области энерговыделения. Рассеяние нетепловых электронов на турбулентных флуктуациях электрических и магнитных полей должно приводить к генерации некогерентного электромагнитного излучения. В случае мелкомасштабной плазменной турбулентности может возникнуть резонансное переходное излучение с достаточно узкой полосой около $f_{pe} \left(1 + f_{ce}^2 / f_{pe}^2\right)$ [Fleishman, 2001; Fleishman et al., 2005]. Этот механизм привлекается для объяснения узкополосных дециметровых всплесчных всплесков. Для генерации излучения на 6 ГГц плотность плазмы в источнике должна превышать полученную выше оценку на порядок. Кроме того, как указывалось выше, в сантиметровом диапазоне излучение с частотой, близкой к фундаментальной плазменной, быстро поглощается вследствие кулоновских столкновений в окрестности источника.

Рассеяние быстрых электронов из-за магнитогидродинамической турбулентности в области всплесчного ускорения электронов также может генерировать узкополосное излучение [Li, Fleishman, 2009]. Характерная частота излучения выше плазменной частоты на фактор, пропорциональный корню отношения характерной энергии излучающих электронов к температуре фоновой плазмы. На таких частотах столкновительное поглощение невелико и не препятствует выходу излучения из источника. Интенсивность такого диффузионного синхротронного излучения пропорциональна количеству быстрых электронов и радикально зависит от уровня и спектра магнитных флуктуаций. В нашем случае требуется уровень магнитных флуктуаций с амплитудой, сравнимой с величиной магнитного поля в петле ($\sim 100 \text{ Гс}$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На динамических спектрах, полученных с помощью BBMS, было обнаружено необычно узкополосное радиоизлучение в полосе 5–7 ГГц, появление которого удалось связать с уярчением корональной рентгеновской точки. Анализ изображений в мягком рентгене и КУФ и расчеты магнитного поля позволяют заключить, что корональная точка представляет собой низкую петлю, возникающую при пересоединении магнитных полей комплексов длинных и коротких петель, укорененных в близких пятнах или порах противоположной полярности. В процессе пересоединения в КУФ наблюдались эрупция волокна и формирование струи, отклик на которые не проявлялся в мягком рентгеновском и микроволновом излучении.

Оценки показывают, что характеристики наблюдаемого спектра микроволнового излучения яркой рентгеновской точки свидетельствуют о когерентном механизме излучения электронов с энергиями выше нескольких десятков килоэлектронвольт на гармонике плазменной частоты. Таким образом, наблюдения обладают высоким диагностическим потенциалом обнаружения нетепловых каналов энерговыделения в транзитных событиях. Можно надеяться, что наблюдения на радиогелиографах нового поколения SRH, MUSER, eOVSA будут способствовать реализации этого потенциала.

Авторы благодарны Григорию Флейшману и Хэмишу Рейду за полезные обсуждения. Также благодарим команды Solar Dynamic Observatory, GOES, обсерватории Нобямы, Радиоастрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН за предоставленные данные. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-22-00019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лесовой С.В., Алтынцев А.Т., Кочанов А.А., и др. Сибирский радиогелиограф: первые результаты. *Солнечно-земная физика*. Т. 3, № 1. С. 3–16. DOI: [10.12737/23588](https://doi.org/10.12737/23588).
- Флейшман Г.Д., Мельников В.Ф. Солнечные миллисекундные радиоспайки. *УФН*. 1998. Т. 168. С. 1265. DOI: [10.3367/UFNr.0168.199812a.1265](https://doi.org/10.3367/UFNr.0168.199812a.1265).
- Altyntsev A.T., Grechnev V.V., Meshalkina N.S., Yan Y. Microwave type III-like bursts as possible signatures of magnetic reconnection. *Solar Phys.* 2007. Vol. 242, iss.1-2. P. 111–113. DOI: [10.1007/s11207-007-0207-9](https://doi.org/10.1007/s11207-007-0207-9).

- Altyntsev A.T., Fleishman G.D., Lesovoi S.V., Meshalkina N.S. Thermal to nonthermal energy partition at the early rise phase of solar flares. *Astrophys. J.* 2012. Vol. 758, 138. DOI: [10.1088/0004-637X/758/2/138](https://doi.org/10.1088/0004-637X/758/2/138).
- Altyntsev A.T., Meshalkina N.S., Fedotova A.Ya., Myshyakov I.I. Background microwave emission and microflares in young active region 12635. *Astrophys. J.* 2020. Vol. 905, iss. 2, 149. DOI: [10.3847/1538-4357/abc54f](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abc54f).
- Aschwanden M.J. *Physics of the Solar Corona. An Introduction*. Chichester: Praxis Publishing Ltd.; Berlin: Springer-Verlag, 2004. 924 p.
- Benz A.O. Millisecond radio spikes. *Solar Phys.* 1986. Vol. 104. P. 99. 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. DOI: [10.1007/BF00155184](https://doi.org/10.1007/BF00155184).
- 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).
- Chiuderi Drago F., Alissandrakis C., Hagyard M. Microwave emission above steady and moving sunspots. *Solar Phys.* 1987. Vol. 112. P. 89. DOI: [10.1007/BF00148490](https://doi.org/10.1007/BF00148490).
- Christe S., Hannah I.G., Krucker S., et al. RHESSI microflare statistics. I. Flare-finding and frequency distributions. *Astrophys. J.* 2008. Vol. 677. P. 1385. DOI: [10.1086/529011](https://doi.org/10.1086/529011).
- Fleishman G.D. Generation of resonance transition emissions in the solar atmosphere. *Astronomy Lett.* 2001. Vol. 27. P. 254. DOI: [10.1134/1.1358383](https://doi.org/10.1134/1.1358383).
- Fleishman G.D., Nita G.M., Gary D.E. Evidence for resonant transition radiation in decimetric continuum solar bursts. *Astrophys. J.* 2005. Vol. 620. P. 506. DOI: [10.1086/427022](https://doi.org/10.1086/427022).
- Gary D.E., Hartl M.D., Shimizu T. Nonthermal radio emission from solar soft X-ray transient brightenings. *Astrophys. J.* 1997. Vol. 477. P. 958. DOI: [10.1086/303748](https://doi.org/10.1086/303748).
- Ginzburg V.L., Syrovatskii S.I. Cosmic magnetobremstrahlung (synchrotron radiation). *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1965. Vol. 3. P. 297. DOI: [10.1146/annurev.aa.03.090165.001501](https://doi.org/10.1146/annurev.aa.03.090165.001501).
- Gopalswamy N., Zhang J., Kundu M.R., et al. Fast time structure during transient microwave brightenings: evidence for nonthermal processes. *Astrophys. J.* 1997. Vol. 491. P. L115–L119. DOI: [10.1086/311063](https://doi.org/10.1086/311063).
- Gudiksen B.V., Nordlund A. An ab initio approach to solar coronal loops. *Astrophys. J.* 2005. Vol. 618, no. 2. P. 1031. DOI: [10.1086/426064](https://doi.org/10.1086/426064).
- Hannah I.G., Christe S., Krucker S., et al. RHESSI microflare statistics. II. X-ray imaging, spectroscopy, and energy distributions. *Astrophys. J.* 2008. Vol. 677. P. 704. DOI: [10.1086/529012](https://doi.org/10.1086/529012).
- Hannah I.G., Hudson H.S., Battaglia M., et al. Microflares and the statistics of X-ray flares. *Space Sci. Rev.* 2011. Vol. 159, 263. DOI: [10.1007/s11214-010-9705-4](https://doi.org/10.1007/s11214-010-9705-4).
- Klimchuk J.A. On solving the coronal heating problem. *Solar Phys.* 2006. Vol. 234, iss.1. P. 41. DOI: [10.1007/s11207-006-0055-z](https://doi.org/10.1007/s11207-006-0055-z).
- Kosugi T., Matsuzaki K., Sakao T., et al. The Hinode (Solar-B) Mission: An overview. *Solar Phys.* 2007. Vol. 243. P. 3. DOI: [10.1007/s11207-007-9014-6](https://doi.org/10.1007/s11207-007-9014-6).
- Kundu M.R., Schmahl E.J., Grigis P.C., et al. Nobeyama radio heliograph observations of RHESSI microflares. *Astron. Astrophys.* 2006. Vol. 451, iss. 2. P. 691. DOI: [10.1051/0004-6361:20053987](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053987).
- 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. P. 17. DOI: [10.1007/s11207-011-9776-8](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9776-8).
- Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Ivanov E.F., Gubin A.V. A 96-antenna radioheliograph. *Res. Astron. Astrophys.* 2014. Vol. 14, iss. 7. P. 864–868. DOI: [10.1088/1674-4527/14/7/008](https://doi.org/10.1088/1674-4527/14/7/008).
- Li Y., Fleishman G. Radio emission from acceleration sites of solar flares. *Astrophys. J.* 2009. Vol. 701. P. L52. DOI: [10.1088/0004-637X/701/1/L52](https://doi.org/10.1088/0004-637X/701/1/L52).
- Lin R.P., Schwartz R.A., Kane S.R., et al. Solar hard X-ray microflares. *Astrophys. J.* 1984. Vol. 283. P. 421. DOI: [10.1086/162321](https://doi.org/10.1086/162321).
- Lopez Fuentes M.C., Klimchuk J.A. A simple model for the evolution of multi-stranded coronal loops. *Astrophys. J.* 2010. Vol. 719. P. 591. DOI: [10.1088/0004-637X/719/1/591](https://doi.org/10.1088/0004-637X/719/1/591).
- Mandrini C.H., Démoulin P., Klimchuk J.A. Magnetic field and plasma scaling laws: Their implications for coronal heating models. *Astrophys. J.* 2000. Vol. 530. P. 999. DOI: [10.1086/308398](https://doi.org/10.1086/308398).
- Meegan C., Lichti G., Bhat P.N., et al. The Fermi Gamma-ray Burst Monitor. *Astrophys. J.* 2009. Vol. 702. P. 791. DOI: [10.1088/0004-637X/702/1/791](https://doi.org/10.1088/0004-637X/702/1/791).
- Meshalkina N.S., Altyntsev A.T., Zhdanov D.A., et al. Study of flare energy release using events with numerous type III-like bursts in microwaves. *Solar Phys.* 2012. Vol. 280. P. 537. DOI: [10.1007/s11207-012-0065-y](https://doi.org/10.1007/s11207-012-0065-y).
- Myachin D.Y., Nefedyev V.P., Uralov A.M., et al. Evolution of active regions in microwave emission at the stage of their initiation. *Proc. Nobeyama Symp.* 1999. Vol. 479. P. 89.
- Nakajima H., Nishio M., Enome S., et al. The Nobeyama Radioheliograph. *IEEE Proc.* 1994. Vol. 82. P. 705.
- Nefed'ev V.P., Agalakov B.V., Kardapolova N.N., Smol'kov G.Ya. The detection of the S-component sunspot source in the initial stage of active-region development. *Ann. Geophys.* 1993. Vol. 11, no. 7. P. 614.
- Nindos A., Kundu M.R., White S.M. A Study of microwave selected coronal transient brightenings. *Astrophys. J.* 1999. Vol. 513. P. 983. DOI: [10.1086/306886](https://doi.org/10.1086/306886).
- Panesar N.K., Sterling A.C., Moore R.L. Magnetic flux cancellation as the origin of solar quiet-region pre-jet minifilaments. *Astrophys. J.* 2017. Vol. 844, 131. DOI: [10.3847/1538-4357/aa7b77](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa7b77).
- Panesar N.K., Sterling A.C., Moore R.L. Magnetic flux cancellation as the trigger of solar coronal jets in coronal holes. *Astrophys. J.* 2018. Vol. 853, 189. DOI: [10.3847/1538-4357/aaa3e9](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaa3e9).
- Parker E.N. Nanoflares and the solar X-ray corona. *Astrophys. J.* 1988. Vol. 330. P. 474. DOI: [10.1086/166485](https://doi.org/10.1086/166485).
- Pesnell W.D., Thompson B.J., Chamberlin P.C. The Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.* 2012. Vol. 275. P. 3. DOI: [10.1007/s11207-011-9841-3](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9841-3).
- Porter J.G., Toomre J., Gebbie K.B. Frequent ultraviolet brightenings observed in a solar active region with solar maximum mission. *Astrophys. J.* 1984. Vol. 283. P. 879. DOI: [10.1086/162375](https://doi.org/10.1086/162375).
- Rudenko G.V., Anfinogentov S.A. Very fast and accurate azimuth disambiguation of vector magnetograms. *Solar Phys.* 2014. Vol. 289. P. 1499. DOI: [10.1007/s11207-013-0437-y](https://doi.org/10.1007/s11207-013-0437-y).
- Schadee A., de Jager C., Svestka Z. Enhanced X-ray emission above 3.5-KEV in active regions in the absence of flares. *Solar Phys.* 1983. Vol. 89. P. 287. DOI: [10.1007/BF00217252](https://doi.org/10.1007/BF00217252).
- Scherrer P.H., Schou J., Bush R.L., et al. The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) investigation for the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.* 2012. Vol. 275. P. 207. DOI: [10.1007/s11207-011-9834-2](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9834-2).
- Schou J., Scherrer P.H., Bush R.L., et al. Design and Ground Calibration of the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Instrument on the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.* 2012. Vol. 275. P. 229–259. DOI: [10.1007/s11207-011-9842-2](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9842-2).
- Shibasaka K., Chiuderi-Drago F., Melozzi M., et al. Microwave, ultraviolet, and soft X-ray observations of hale region 16898. *Solar Phys.* 1983. Vol. 89. P. 307. DOI: [10.1007/BF00217253](https://doi.org/10.1007/BF00217253).
- Shibata K., Nozawa S., Matsumoto R. Magnetic reconnection associated with emerging magnetic flux. *Publ. Astron. Soc. Japan.* 1992. Vol. 44. P. 265.
- 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. DOI: [10.1086/173782](https://doi.org/10.1086/173782).

Thomas R., Starr R., Crannell C. Expressions to determine temperatures and emission measures for solar X-ray events from GOES measurements. *Solar Phys.* 1985. Vol. 95. P. 323. DOI: [10.1007/BF00152409](https://doi.org/10.1007/BF00152409).

Trubnikov B.A. Particle Interactions in a fully ionized plasma. *Rev. Plasma Phys.* 1965. Vol. 1. P. 105.

Warnecke J., Peter H. Data-driven model of the solar corona above an active region. *Astron. Astrophys.* 2019. Vol. 624. Id. L12. P. 5. DOI: [10.1051/0004-6361/201935385](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935385).

White S.M., Kundu M.R., Shimizu T., et al. The radio properties of solar active region soft X-ray transient brightenings. *Astrophys. J.* 1995. Vol. 450. P. 435. DOI: [10.1086/176153](https://doi.org/10.1086/176153).

Wright P.J., Hannah I., Grefenstette B., et al. Microflare heating of an active region observed with NuSTAR, Hinode/XRT, and SDO/AIA. *Astrophys. J.* 2017. Vol. 844, 132. DOI: [10.3847/1538-4357/aa7a59](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa7a59).

Yasnov L.V., Bogod V.M., Fu Q., Yan Y. A study of non-thermal radio emission features using fine spectral BAO and high-sensitivity RATAN observations of a solar active region. *Solar Phys.* 2003. Vol. 215. P. 343. DOI: [10.1023/A:1025666810398](https://doi.org/10.1023/A:1025666810398).

Yokoyama T., Shibata K. Magnetic reconnection as the origin of X-ray jets and H α surges on the Sun. *Nature.* 1995. Vol. 375. P. 42. DOI: [10.1038/375042a0](https://doi.org/10.1038/375042a0).

Yokoyama T., Shibata K. Numerical simulation of solar coronal X-ray jets based on the magnetic reconnection model. *Publ. Astron. Soc. Japan.* 1996. Vol. 48. P. 353–376. DOI: [10.1093/pasj/48.2.353](https://doi.org/10.1093/pasj/48.2.353).

Young P.R., Tian H., Peter H., et al. Solar ultraviolet bursts. *Space Sci. Rev.* 2018. Vol. 214, iss. 8, 120, 39 p. DOI: [10.1007/s11214-018-0551-0](https://doi.org/10.1007/s11214-018-0551-0).

Zaitsev V.V., Stepanov A.V. The plasma radiation of flare kernels. *Solar Phys.* 1983. Vol. 88. P. 297. DOI: [10.1007/BF00196194](https://doi.org/10.1007/BF00196194).

Zaitsev V.V., Kruger A., Hildebrandt J., Kliem B. Plasma radiation of power-law electrons in magnetic loops: Application to solar decimeter-wave continua. *Astron. Astrophys.* 1997. Vol. 328. P. 390.

Zhang J., Kundu M.R., White S.M., et al. Reconciling extreme-ultraviolet and radio observations of the Sun's corona. *Astrophys. J.* 2001. Vol. 561. P. 396. DOI: [10.1086/323212](https://doi.org/10.1086/323212).

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

Как цитировать эту статью:

Алтынцев А.Т., Мешалкина Н.С., Мышьяков И.И. Когерентное микроволновое излучение как индикатор нетеплового энерговыделения в рентгеновской корональной точке. *Солнечно-земная физика.* 2022. Т. 8, № 2. С. 4–11. DOI: [10.12737/szf-82202201](https://doi.org/10.12737/szf-82202201).