

**ПРОЦЕССЫ УСКОРЕНИЯ И ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОНОВ
В ИМПУЛЬСНОЙ КРУГОВОЙ ЛЕНТОЧНОЙ ВСПЫШКЕ****PROCESSES OF ACCELERATION AND TRANSFER
OF ELECTRONS IN A PULSE CIRCULAR RIBBON FLARE****А.Т. Алтынцев** *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
Государственная ключевая лаборатория солнечной
активности и космической погоды,
Национальный научный космический центр КАН,
Пекин, Китай***С.А. Анфиногентов***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, anfinogentov@iszf.irk.ru***Д.А. Жданов***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, zhdanov@iszf.irk.ru***И.И. Мышьяков** *Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, ivan_m@iszf.irk.ru***Е.Ф. Иванов** *Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, eugenessrt@gmail.com***Чэнмин Тань***Государственная ключевая лаборатория солнечной
активности и космической погоды,
Национальный научный космический центр КАН,
Пекин, Китай, tanchengming@nssc.ac.cn***Чжао У***Школа космических наук и физики,
Шандоньский университет,
Вейхай, Китай, wuzhao@sdu.edu.cn
Лаборатория электромагнитного детектирования,
Институт космических наук,
Шандоньский университет,
Вейхай, Китай***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
State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather,
National Space Science Center CAS,
Beijing, China***S.A. Anfinogentov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, anfinogentov@iszf.irk.ru***D.A. Zhdanov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, zhdanov@iszf.irk.ru***I.I. Myshyakov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, ivan_m@iszf.irk.ru***E.F. Ivanov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, eugenessrt@gmail.com***Chengming Tan***State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather,
National Space Science Center CAS,
Beijing, China, tanchengming@nssc.ac.cn***Zhao Wu***School of Space Science and Physics,
Shandong University,
Weihai, China, wuzhao@sdu.edu.cn
Laboratory for Electromagnetic Detection,
Institute of Space Sciences,
Shandong University,
Weihai, China*

Аннотация. Обсуждаются ускорение и перенос электронов в круговой вспышке SOL2024-03-25T06:37:00 рентгеновского класса M4.4, отличающейся рекордно короткой длительностью импульса жестких излучений. Используются радиоданные в диапазоне 0.1–40 ГГц, включая изображения вспышечной области в диапазоне частот Сибирского радиогелиографа. Микроволновое и жесткое рентгеновское излучения генерируются в окрестности магнитного домена при взаимодействии жгутов, видимых в области 1600 Å. Импульсная стадия заканчивалась коротким пиком длительностью менее 5 с, регистрируемым синхронно на 35 ГГц и в диапазоне 100–300 кэВ. После пика над жгутами поднимается длинная петля в ультрафиолетовом (УФ) излучении и появляется широкий выброс плазмы, направленный вдоль наблю-

Abstract. We discuss acceleration and transport of electrons in the circular flare SOL2024-03-25T06:37:00 of the M4.4 X-ray class, characterized by a record-short duration of hard X-ray emission pulse. We have used radio data in the 0.1–40 GHz range, including images of the flare region in the Siberian Radio Heliograph frequency range. Microwave and hard X-ray emissions are generated in the vicinity of the magnetic domain by the interaction of ropes visible at 1600 Å. The impulsive stage ended with a short peak <5 s long, recorded simultaneously at 35 GHz and in the 100–300 keV range. After the peak, a long loop in the ultraviolet (UV) rises and a broad plasma ejection appears which is directed along the outer spine observed before the flare. Large loops connect the spine and the remote source. There is a broadband microwave source at the remote footpoint

давшегося перед вспышкой внешнего шипа. Большие петли соединяют шип и удаленный источник. В удаленном на 215 угл. сек основании наблюдался широкополосный микроволновый источник, задержка которого от пика в ядре вспышки составляет ~ 5 с, а оценка скорости распространения электронов достигает трети скорости света. Отличительной особенностью излучения удаленного источника являлась высокая степень его круговой поляризации. Метровое излучение вспышки свидетельствует о заполнении вершин больших петель нетепловыми электронами с большими питч-углами. Впервые полученная совокупность пространственных, спектральных и поляризационных характеристик микроволновых источников обсуждается в контексте известных к настоящему времени результатов о природе круговых ленточных вспышек.

Ключевые слова: Солнце, механизмы ускорения, микроволновые всплески, метровые всплески, круговая ленточная вспышка.

at 215 arc. sec., with the delay of its maximum from the peak in the flare core being ~ 5 s, and the electron propagation velocity along the large loops estimated at one-third of the velocity of light. A distinctive feature of the radiation of the remote source was high degree of its circular polarization. The meter flare emission indicates that tops of large loops are filled with non-thermal electrons with large pitch angles. The set of spatial, spectral, and polarization characteristics of microwave sources obtained for the first time is discussed in the context of the known results on the nature of circular ribbon flares.

Keywords: Sun, acceleration mechanisms, microwave bursts, meter bursts, circle ribbon flare.

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения последних лет обнаружили, что одним из основных являются круговые ленточные вспышки, которые происходят в особой магнитной конфигурации с доменом фотосферного магнитного поля, вкрапленным в область с полями противоположной магнитной полярности. Над таким доменом находится куполообразная сепаратрисная поверхность, в вершине которой находится точка с нулевым магнитным полем [Priest, Titov, 1996, Masson et al., 2009, Sun et al., 2013]. От этой точки внутрь купола и от него вверх выходят так называемые шипы (spines). Векторы магнитного поля в окрестности шипов направлены вдоль них и противоположны по знаку. Поля рядом с внутренним шипом направлены от фотосферы из центра домена, а поля в окрестности внешнего шипа проявляются в КУФ-наблюдениях (крайний ультрафиолет) как крупномасштабные петли, далекие основания которых замыкаются на области фотосферы с вертикальными полями того же знака, что и поле домена. Удаленные основания этих петель могут быть расположены в сотнях угловых секунд от домена, т. е. ядра вспышки. Круговые ленточные вспышки часто сопровождаются корональными струями, радиовсплесками III типа, корональными выбросами массы, ударными волнами, корональными затемнениями и изгибными колебаниями корональных петель и волокон (см., например, последний обзор [Zhang, 2024]).

Предполагается, что энерговыделение круговых вспышек происходит в процессах магнитного пересоединения не только при взаимодействии структур внутри домена, но и в токовых слоях, формирующихся на сепаратрисных поверхностях вблизи нулевой точки [Pontin et al., 2013]. Другой особенностью круговых вспышек является отклик в удаленных источниках на энерговыделение в ядре вспышки. Энергия для их активизации в КУФ- и радиоизлучениях

переносится частицами и волнами. В случае выбросов плазмы особенности круговых вспышек связаны с их замкнутой купольной магнитной структурой. Выбросы плазмы должны сопровождаться существенным изменением топологии магнитного поля над доменом.

Одним из недостаточно изученных вопросов физики круговых вспышек является ускорение и перенос частиц в принципиально трехмерной топологии областей энерговыделения. Для исследования процессов ускорения электронов естественно привлечение радиоданных, которые позволяют регистрировать потоки нетепловых электронов в корональных магнитных структурах с плотностью плазмы, недостаточной для регистрации тормозного рентгеновского излучения нетепловых электронов. К настоящему времени публикаций о результатах радионаблюдений круговых вспышек относительно немного. В статье [Meshalkina et al., 2009] обсуждались конфигурация и сценарий двух таких вспышек, картографирование которых выполнялось Радиогелиографом Нобейма (NoRH — Nobeyama Radio Heliograph [Torii et al., 1979]) на 17 и 34 ГГц. Драйверами исследованных вспышек было взаимодействие жгутов, расположенных внутри куполообразной сепаратрисной поверхности. Откликом на ускорение электронов во время вспышки был импульс жесткого рентгеновского излучения в канале 50–100 кэВ спутника RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) и микроволнового излучения на 17 ГГц длительностью ~ 1 мин. В микроволновом излучении в это время наблюдался также удаленный источник с высокой степенью круговой поляризации (до 50 %), расположенный в 120 угл. сек от ядра вспышки. Знак поляризации излучения удаленного источника соответствовал необыкновенной волне. Во вспышке, исследованной в [Altyntsev et al., 2022], наблюдались колебания микроволнового излучения на ча-

стоте 5.7 ГГц с периодом ~ 8 с как в удаленном источнике, так и в ядре вспышки. Колебания излучения в ядре вспышки объяснялись модуляцией процесса ускорения при взаимодействии токовых жгутов внутри домена, а отклик в удаленном на 60 угл. сек источнике был вызван нетепловыми электронами, приходящими из ядра со скоростью $(1.5 \div 2) 10^{10}$ см/с.

Вспышка с другим драйвером — магнитным пересоединением в окрестности нулевой точки — обсуждалась в [Kumar et al., 2016]. Во время вспышки наблюдались квазипериодические пульсации жесткого рентгеновского и микроволновых излучений с периодом ~ 3 мин. Авторы полагают, что колебания были вызваны вариациями процесса ускорения электронов в окрестности нулевой точки. В этом событии удаленный источник не был обнаружен.

Более детально были исследованы микроволновые источники во вспышке с круговыми лентами SOL2014-12-17T04:51 рентгеновского класса M8.7 [Chen et al., 2019; Lee et al., 2020]. Помимо данных AIA/SDO, при изучении динамики структуры вспышки использовались последовательности радиокарт радиогелиографов MUSER (MingantU SpEctral Radioheliograph) [Yan et al., 2009], доступные в диапазоне 1–2 ГГц, и NoRH [Nakajima et al., 1994]. Сравнение потоков на частотах 17 и 34 ГГц показало, что в начале вспышки рост радиоизлучения можно объяснить тепловым нагревом плазмы внутри магнитного домена благодаря пересоединению в магнитной нулевой точке. Признаки нетеплового энерговыделения проявляются во время ступенчатого роста микроволнового потока за несколько минут до импульсной фазы. Во время импульсной фазы длительностью ~ 10 мин доминирует излучение из жгута внутри купола, причем вблизи оснований жгута появляются микроволновые источники с противоположными знаками круговой поляризации. Удаленный источник наблюдался на картах на частоте 17 ГГц, однако в профиле интенсивности излучения удаленного источника импульсная фаза не проявляется. Поток излучения удаленного источника увеличивался постепенно в течение вспышки, подобно росту КУФ-излучения. Это позволило авторам предположить, что микроволновое излучение удаленного источника генерируется тормозным механизмом. Из карт MUSER следует, что источники, излучающие на 1.2–2.0 ГГц, находились над нулевой точкой магнитного домена.

В нашей работе обсуждаются сценарий и динамика процессов ускорения и переноса электронов во время круговой вспышки SOL2024-03-25T06:37 рентгеновского класса M4.4, отличающейся рекордно короткой длительностью жесткого излучения (~ 5 с на полувысоте в канале 100–300 кэВ).

ИНСТРУМЕНТЫ

Для анализа динамики пространственной структуры вспышки использовались УФ- и КУФ-изображения AIA/SDO, и магнитограммы HMI (Helioseismic and Magnetic Imager) космической миссии SDO [Lemen et al., 2012]. Следует отметить, что периодичность наблюдений AIA/SDO ~ 12 с недостаточна для наблюдения динамики развития этой вспышки. Кроме того,

непосредственно во время импульса вспышечного энерговыделения практически все изображения на всех каналах AIA были пересвечены.

Микроволновые источники наблюдались с помощью трех антенных решеток Сибирского радиогелиографа (СРГ) [Lesovoi et al., 2014; Лесовой, Кобец, 2017; Алтынцев и др., 2020]. Картографирование проводилось сканированием по частоте независимо в каждом диапазоне (3–6, 6–12, 12–24 ГГц) с периодичностью во времени 3.5 с. Пространственное разрешение картографирования зависит от частоты и локального времени наблюдений. В работе использовались частоты от 2.8 до 12.2 ГГц с размерами диаграмм направленности, меняющимися от 23×83 до 10×18 угл. сек. Для построения изображений использовался пакет программного обеспечения Анфиногентова [<https://radiomag.iszf.irk.ru/books/sibirskii-radiogeliograf/page/sintez-radioizobrazhenii-s-pomoshhiu-paketa-srh-synth>]. Для анализа временных профилей радиоизлучения использовались измерения полного потока СРГ [<https://badary.iszf.irk.ru/srhCorrPlot.php>].

Спектры интегрального радиоизлучения Солнца измерялись с временным разрешением 1 с с помощью NoRP (Nobeyama Radio Polarimeters) [Torii et al., 1979] на пяти частотах в диапазоне 1.0–17.0 ГГц, Бадарского широкополосного микроволнового спектрополяриметра (БШМС), [Zhdanov, Zandanov, 2011] на 26 частотах в диапазоне 4–8 ГГц.

В нашем исследовании мы использовали спектры от спектрополяриметра комплекса СРГ СОЛАРСПЕЛ 50–3000 МГц с временным разрешением 0.5 с и частотным 1 МГц.

Потоки на высоких частотах 35.25–39.75 ГГц были доступны во время импульсной стадии в наблюдениях CBS (Chashan Broadband Solar millimeter spectrometer) [Shang et al., 2022, 2023], записывающего динамический спектр в диапазоне 35–40 ГГц. Были использованы данные с частотным разрешением 0.5 ГГц и временным 0.537 с.

Интегральные спектры в диапазоне 1.6–2.0 ГГц были получены с помощью радиоинтерферометра MUSER-I (Китай). Диапазон частот MUSER-I охватывает 0.4–2.0 ГГц [Yan et al., 2016]. Событие 25.03.2024 наблюдалось в левой круговой поляризации со спектральным разрешением 16 МГц и временным 3.125 мс.

Мы использовали также данные радиотелескопа в Learmonth (Австралия), перекрывающиеся по времени с другими радиоданными. Телескоп входит в RSTN (United States Air Force Radio Solar Telescope Network) [Guidice et al., 1981], инструменты которой измеряют интенсивность на восьми частотах (245, 410, 610, 1415, 2695, 4995, 8800 и 15400 МГц) с разрешением 1 с.

Потоки жесткого рентгеновского излучения измерялись с помощью Fermi/GBM (Fermi Gamma-Ray Burst Monitor) [Meegan et al., 2009] с временным разрешением 1 с.

НАБЛЮДЕНИЯ

Магнитная структура с доменом, изолированной компактной областью положительного вертикального

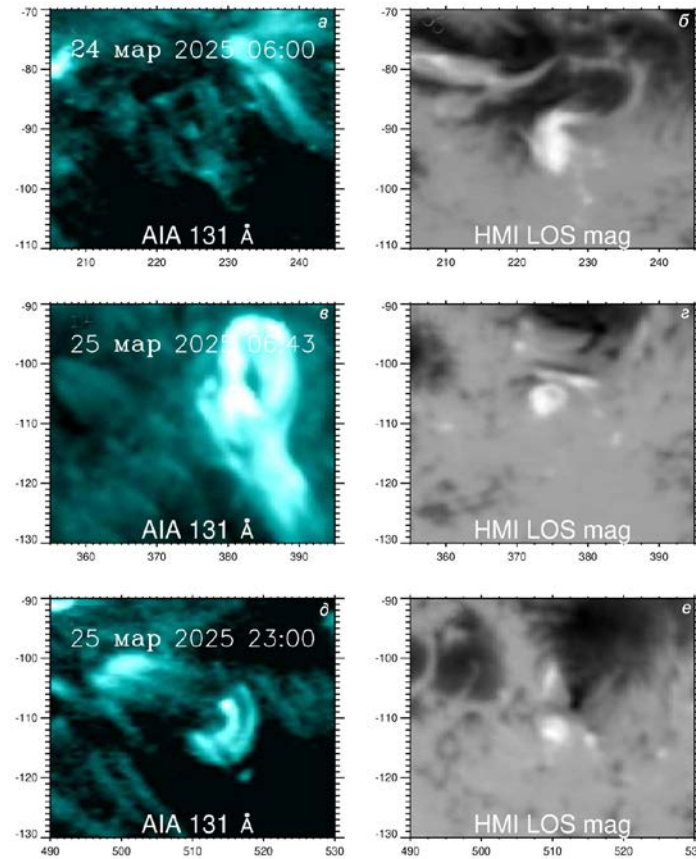


Рис. 1. показывает изображения AIA/SDO в канале 131 Å в разные моменты времени (слева); справа — магнитограммы SDO/HMI в моменты времени, ближайшие к указанным в левом столбце. По осям — угловые секунды относительно центра диска Солнца

поля, окруженной полями обратной полярности, сформировалась 24 марта в южной части активной области (АО) 13615. На изображениях в КУФ-линиях AIA/SDO с 10:00 UT 24 марта 2024 г. появилась кольцевая структура вокруг домена и временами видна струя (шип), уходящая от этой структуры в южном направлении. Эта конфигурация прослеживается непрерывно до 00:00 UT 26 марта, когда домен положительного поля значительно уменьшается в размерах, а кольцевая структура в КУФ-линиях исчезает. Значимых вспышек, кроме исследуемого события, в эти дни не наблюдалось.

На рис. 1 показаны три момента времени развития АО в окрестности магнитного домена. Время здесь и далее приведено в UT. Видно, что магнитная структура со временем развивается: 24 марта начинает выделяться фрагмент на севере домена, и в день вспышки он отделился. К 26 марта этот фрагмент удалился к северу, а на запад отделился еще один фрагмент.

Вспышка рентгеновского класса M4.4 произошла в этой структуре 25 марта 2024 г. Начало роста мягкого рентгеновского излучения отмечается в 06:37, а конец спада — в 06:48. Пик импульсной фазы, когда наблюдался короткий импульс жесткого рентгеновского излучения с энергией фотонов выше 100 кэВ, был зарегистрирован в 06:43:24. Во время вспышки

АО находилась в центральной части солнечного диска. Вспышка отличается высокой яркостью во всех УФ- и КУФ-диапазонах регистрации AIA/SDO.

Последовательности не засвеченных КУФ-изображений в линиях 304 и 131 Å показаны на рис. 2 во время импульсной фазы. В первые два момента времени вспышечные структуры имеют петлеобразную форму. Отметим, что узкая струя, распространяющаяся на юг в картинной плоскости, наблюдалась впервые в линии 171 Å на кадре 06:40:57. Яркость и длина струи, которую можно рассматривать как проявление внешнего шипа магнитной структуры, начинают расти после 06:42. Между 06:43:17 и 06:43:30 поперечный размер струи значительно увеличивается, что указывает на модификацию магнитной структуры вблизи нулевой точки и внешнего шипа. В дальнейшем яркая область выброса плазмы расширяется, и в ней выделяются фрагменты, вытянутые вдоль магнитного поля.

Плазма выброса заполняла крупномасштабные петли, которые становятся видны в КУФ-излучении через 4 мин после начала выброса (рис. 3). На панели а в основаниях больших петель контурами показаны микроволновые источники, излучающие в максимуме микроволнового потока (06:43:24) на частоте 8 ГГц. В ядре вспышки наблюдается структура, характерная для магнитного жгута: источник в интенсивности,

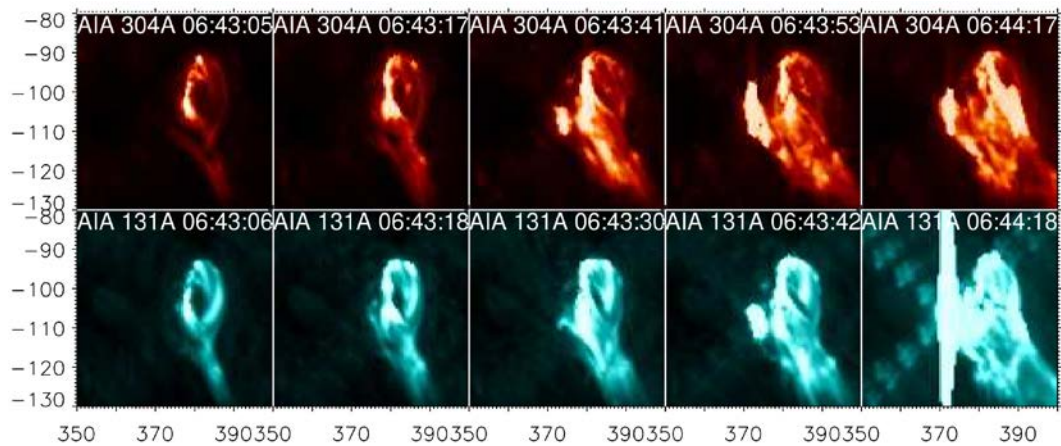


Рис. 2. Последовательности изображений ядра вспышки в линиях 304 Å и 131 Å. Время приведено в UT. Размер кадра 50×50 угл. сек. Центры кадров 378/–104 угл. сек от центра солнечного диска

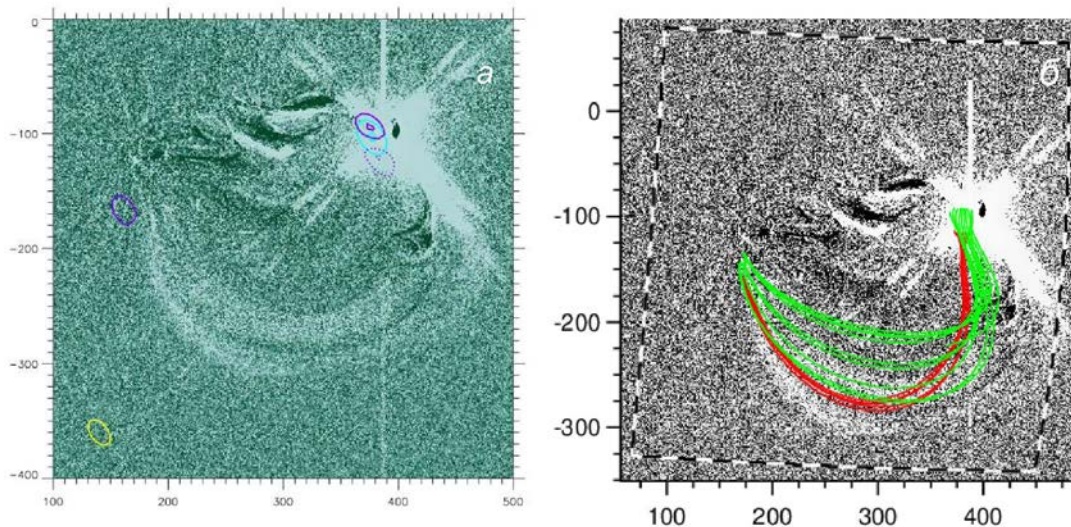


Рис. 3. Область вспышки с удаленным источником: *a* — разностное изображение в 06:46 в линии 94 Å. Вычтено изображение в 06:41. Контурами на уровнях (0.5, 0.95) от максимума/минимума показаны микроволновые источники. Голубые контуры — интенсивность на частоте 8 ГГц (СРГ); фиолетовые — круговая поляризация: сплошной — правая круговая поляризация Right Circular Polarization (RCP); пунктирный — левая круговая поляризация Left Circular Polarization (LCP). Желтый овал в левом нижнем углу — ширина диаграммы направленности на 8 ГГц, ее размер 15×25 угл. сек. *б* — зелеными и красными линиями показаны силовые линии магнитного поля, рассчитанного в потенциальном приближении. Черный контур — граница расчетной области. Фон представлен разностное изображение из рисунка слева.

по краям которого находятся источники с разной круговой поляризацией. Удаленные основания петель находились на расстоянии ~215 угл. сек к востоку от ядра вспышки в области с северным направлением магнитного поля. На панели *б* показаны силовые линии магнитного поля, рассчитанного в потенциальном приближении по методу функции Грина по векторной магнитограмме HMI/SDO на время 06:48 UT. Видно хорошее согласие между наблюдаемыми и рассчитанными структурами, что позволяет использовать результаты расчетов для оценки параметров плазмы и магнитного поля в больших петлях.

Рассмотрим подробнее структуру ядра вспышки. На рис. 4 показаны изображения в линии 131 Å в 06:43:18 за несколько секунд до пика жесткого рентгеновского излучения (*a*); магнитограмма продольного магнитного поля и изображение ядра вспышки в линии 1600 Å в 06:43:26 (*б*). Поле домена

было положительным, его величина достигала 800 Гс. Вспышка была инициирована, по-видимому, отделением небольшого фрагмента от северной части домена (см. рис. 1, *з*). В КУФ-излучении наблюдается кольцевая структура, депрессии яркости в которой соответствует положение магнитного домена. Размеры и формы кольца близки в разных диапазонах КУФ-излучения. На юге к кольцу примыкает яркая область истечения плазмы вдоль силовых линий магнитного поля в окрестности внешнего шипа.

Контурами показаны микроволновые источники в интенсивности и поляризованном микроволновом излучении на частоте 12.2 ГГц. В левом нижнем углу желтым контуром показан овал, который соответствует полувысоте диаграммы направленности. Размеры диаграммы сравнимы с размерами источников. Результат деконволюции в предположении, что формы диаграммы и источника представляют собой

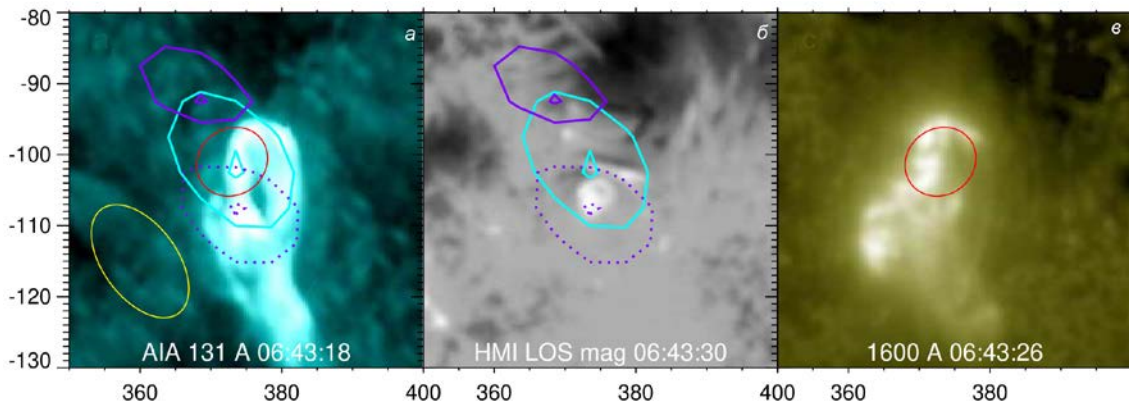


Рис. 4. Структура вспышечной области в линии 131 Å в 06:43:18 (а); магнитограмма продольного магнитного поля в 06:43:30 (б); изображение в линии 1600 Å (в). Красный овал на панелях а, в отмечает реальный источник с размерами 9.3×10.4 угл. сек после деконволюции с диаграммой на 12 ГГц. Желтый овал в левом нижнем углу показывает диаграмму направленности на 12 ГГц 10.5×18.3 угл. сек. Контурными на а, б показаны микроволновые источники в 06:43:24 на частоте 12 ГГц в интенсивности (R+L, голубой контур), и поляризации — фиолетовый контур (сплошной — RCP (0.5, 0.95 от максимума); пунктирный — LCP (0.5, 0.95 от минимума)).

двумерные гауссовы функции, показан красным овалом на панелях а, в. Следует отметить, что положение центра яркости микроволнового источника сохраняется во времени. По краям от центра яркости в интенсивности (голубой контур) находятся источники с противоположными направлениями круговой поляризации (фиолетовые контуры), т. е. структура микроволнового излучения указывает на существование петель или жгутов.

На панели в показано изображение в диапазоне AIA 1600 Å практически в максимуме жесткого рентгеновского излучения. Видно, что основной радиосточник находится над частью длинного жгута, расположенного рядом с доменом магнитного поля, и вытянутого в северо-западном направлении. В УФ-излучении, как и в КУФ-излучении, видно течение плазмы в южном направлении, но поперечный размер течения стал гораздо шире.

Временные профили электромагнитного излучения нетепловых электронов, ускоренных во время вспышки, показаны на рис. 5. На высокие энергии ускоренных электронов указывает регистрация микроволнового излучения с помощью CBS на 35–40 ГГц, и в жестком рентгеновском излучении в канале 100–300 кэВ на спектрометре FERMI/GBM. Измерения интегрального потока Солнца антеннами СРГ с разрешением 3.5 с приведены на частотах 2.8, 8 и 23.4 ГГц. Треугольниками показаны моменты регистрации на этих частотах. С разрешением 1 с измерялись потоки на 17 (NoRP), 8.1 ГГц (БШМС) и интенсивность жесткого рентгеновского излучения (FERMI/GBM). Наилучшее разрешение 0.5 с было у китайского спектрометра CBS.

Заметный рост вспышечного излучения начинается около 06:42:48 (штрих-пунктирная линия) на частотах ниже 8 ГГц при энергиях фотонов ниже 20 ГэВ. Через 16 с при энергиях фотонов до 50 кэВ начинает расти излучение в диапазоне 8–17 ГГц, интенсивность которого достигает локального максимума через 9 с

в 06:43:13. В каналах, регистрирующих более жесткие излучения, сигнал начинает расти через несколько секунд в 06:43:19 (штрих-пунктирная линия) и достигает максимума через 5.5 с. В каналах 35 ГГц и >50 кэВ сигнал падает наиболее быстро, за 2–3 с, а затем скорость спада уменьшается. В то же время на верхних панелях рис. 5, на которых показано излучение электронов более низких энергий, сигналы после импульса жесткого излучения не падают, а растут. Отметим, что импульсы микроволнового и жесткого рентгеновского излучений наблюдаются на фронте роста мягкого рентгеновского излучения, максимум которого отмечался в 06:44:35, т. е. более чем через 1 мин. Подобная зависимость характерна для эффекта Ньюперта, когда мягкое рентгеновское излучение генерируется плазмой, нагретой потоками ускоренных электронов.

Как было показано выше (см. рис. 4, в), микроволновый источник проецируется на длинный жгут, наблюдаемый в диапазоне 1600 Å. Динамику формирования жгута можно проследить на изображениях рис. 6. Видно (верхний ряд), что перед импульсной фазой имеются два жгута, вытянутых друг за другом в северо-западном направлении. В области сближения их оснований наблюдается яркая область, которая в импульсной фазе немного поднимается вверх. В этой фазе (средний ряд) яркость распределяется вдоль появляющегося общего жгута и уширяется область истечения плазмы. После импульсной фазы (нижний ряд) область течения плазмы расширяется до длины жгута. Скорость переднего фронта течения можно оценить по изображениям нижнего ряда как 330 км/с в картинной плоскости.

Наблюдения СРГ позволили выделить микроволновые потоки ядра вспышки и удаленного источника. При расстоянии между источниками 215 угл. сек задержка между максимумами временных профилей этих источников составляет ~5 с. Спектры источников в максимуме импульсной фазы показаны на рис. 7, а.

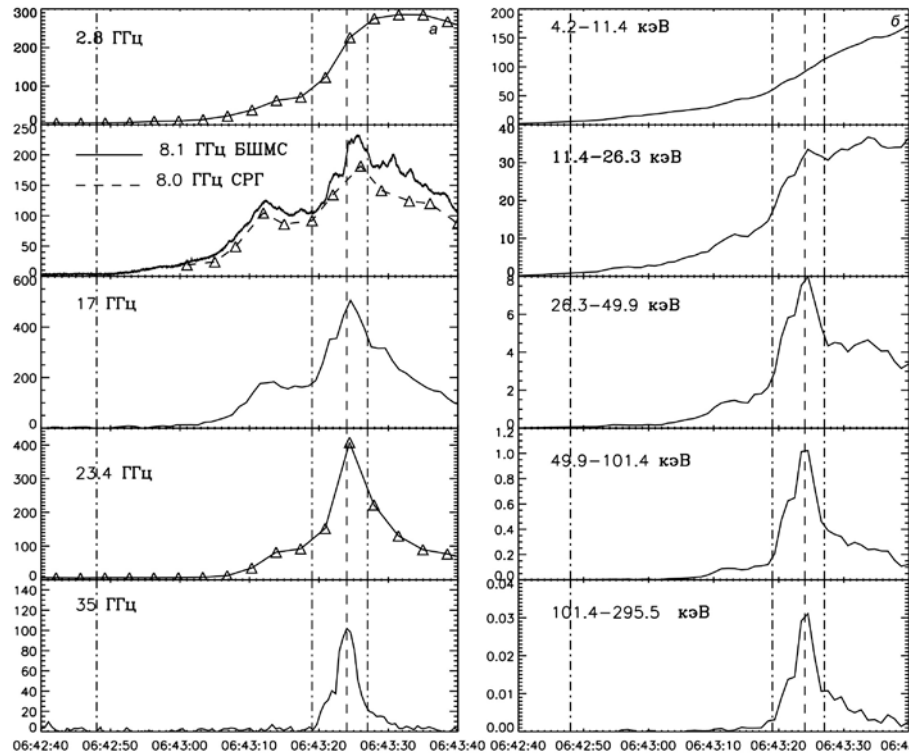


Рис. 5. Временные профили микроволнового (а) и жесткого рентгеновского (б) излучений. Показаны частоты приема и границы каналов в энергиях. Используемые инструменты и временное разрешение измерений описаны в тексте. На кривых СРГ 2.8, 8 и 23.4 ГГц треугольниками отмечены моменты времени измерений на этих частотах. Показаны моменты времени, отмеченные вертикальными штрих-пунктирными линиями 06:42:48, 06:43:19, 06:43:28. Штриховая линия — пик жесткого рентгеновского излучения в 06:43:24

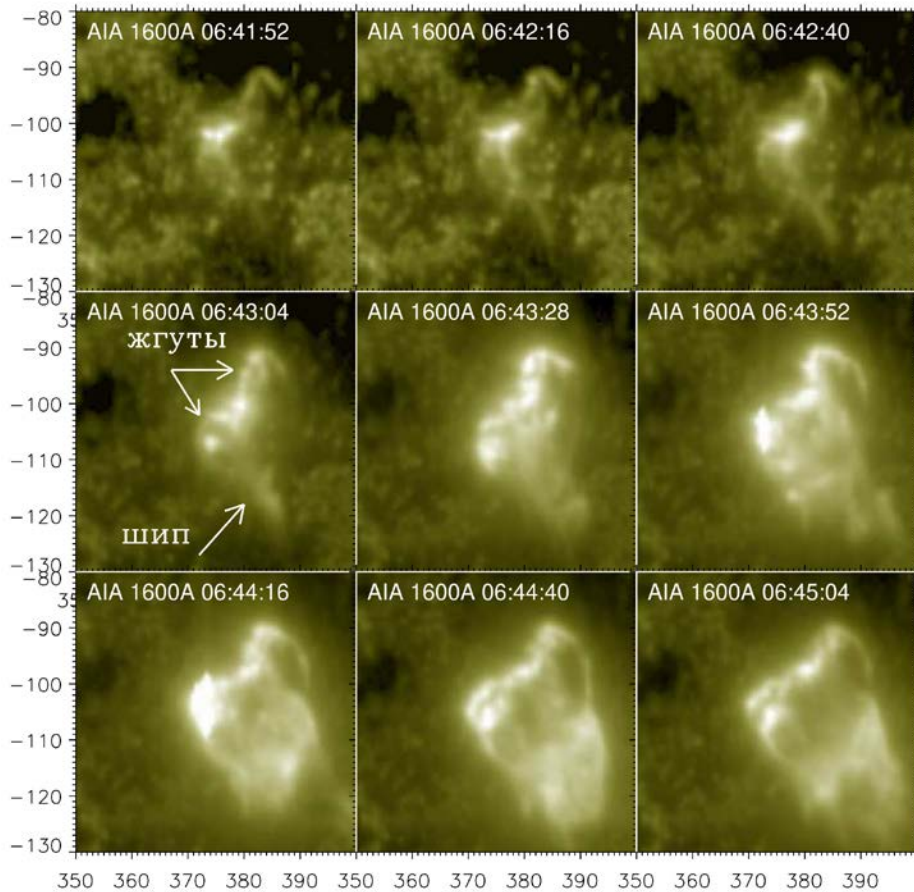


Рис. 6. Развитие жгута в области вспышки, изображения в канале 1600 Å AIA/SDO в разные моменты времени

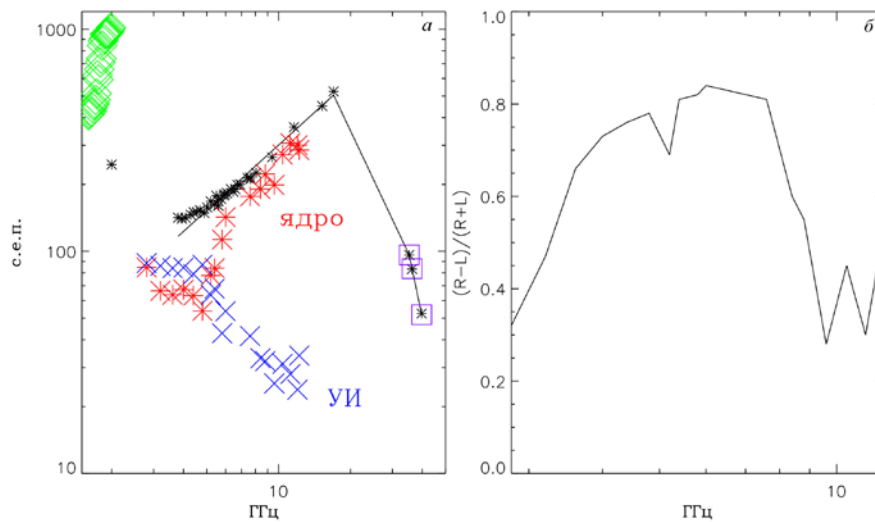


Рис. 7. Композитный спектр в пике вспышки 06:43:25 (а). Красные звездочки — данные СРГ, потоки собраны по изображениям в ядре вспышки; синие кресты — в удаленном источнике; черные звездочки — интегральный спектр из данных СРГ, БШМС, NoRP; черные звездочки в фиолетовых квадратах — данные CBS; зеленые ромбы — данные MUSER-I. Спектр степени поляризации для удаленного источника (б)

Черные звездочки — спектр интегрального потока по данным БШМС (диапазон 4–8 ГГц), СРГ (11.6 и 15.24 ГГц), NoRP (9.4 и 17 ГГц) и CBS (35.25, 36.25, 39.75 ГГц) для момента максимума всплеска в 06:43:24. Поскольку длительность рассматриваемого пика меньше, чем временное разрешение кривых интегрального потока СРГ (3.5 с), не все частоты СРГ можно было использовать для анализа. При построении спектра по данным СРГ мы выбирали только те частоты наблюдения, которые по времени находились внутри 0.5-секундного интервала относительно выбранного момента времени, что соответствовало временному разрешению данных CBS.

Форма спектра на частотах выше 2 ГГц типична для гиротропного спектра. Излучение ядра становится доминирующим в интегральном спектре на частотах выше 6 ГГц, а индекс роста спектра составляет $f^{1.4}$. Степенной индекс спада можно описать как $f^{-2.5}$. Напротив, в спектре удаленного источника диапазон частот СРГ захватывает спадающую часть спектра. После плоской части спектра, на которой поток удаленного источника сравним с потоком из ядра вспышки, спад начинается после 4 ГГц с индексом $f^{-1.1}$. Следующей особенностью удаленного источника является высокая степень правой круговой поляризации. В диапазоне частот от 4.5 до 7.5 ГГц она достигает 80 % (см. рис. 7, б).

Измерения динамического спектра на более низких частотах получены с помощью спектрополяриметра СОЛАРСПЕЛ с диапазоном принимаемых частот 50–3000 МГц (рис. 8, а). В его динамическом спектре (а) наблюдался отклик на вспышку в диапазоне частот 80–350 МГц. Излучение начинается в узкой полосе ~350 МГц в 06:43:00 и продолжалось в этой полосе около 40 с. В широкой полосе излучение начинается в 06:43:10 с максимальной интенсивностью во время пика жесткого излучения. Излучение постепенно затухает, вначале на более высоких частотах.

На рис. 8, б показан динамический спектр MUSER-I. Данные и рисунок получены с использованием разработанных китайскими коллегами программ, включая калибровку и улучшение качества изображения [Wang et al., 2013; Tan et al., 2015]. Данные MUSER-I 1600–2000 МГц показывают отклик на вспышку в излучении от 1750–2000 МГц. Отметим, что на динамическом спектре (а) это излучение не наблюдалось из-за более низкой чувствительности антенны СОЛАРСПЕЛ 50–3000 МГц в верхней части рабочего диапазона (выше 1000 МГц). Амплитуда сигналов MUSER-I резко возрастала в момент пика. Поток интегрального спектра быстро спадает с уменьшением частоты и прекращается на частотах ниже 1850 МГц (см. рис. 8, б). Наблюдается небольшой дрейф к низким частотам. К сожалению, для данного события есть запись только в левой поляризации спектрометра, поэтому для представления на спектре и сопоставления с микроволновыми данными калиброванные данные LCP умножались на два (см. рис. 7, а, зеленые ромбы).

ОБСУЖДЕНИЕ

Совокупность данных о динамике и пространственной структуре вспышки позволяет определить исследуемое событие как круговую ленточную вспышку с компактным доменом положительного поля в ядре и удаленным источником на расстоянии 215 угл. сек. Магнитная структура была образована за день до вспышки, о чем свидетельствует появление квазистационарной круговой структуры в КУФ-излучении вокруг магнитного домена [Masson et al., 2009]. Инициация импульсной фазы вспышки видна на изображениях ядра вспышки в каналах 1600 Å: вначале появляется компактный яркий источник, находящийся севернее домена положительного поля (см. рис. 6). Он находится в месте сближения оснований двух жгутов, вытянутых последовательно в северо-западном направ-

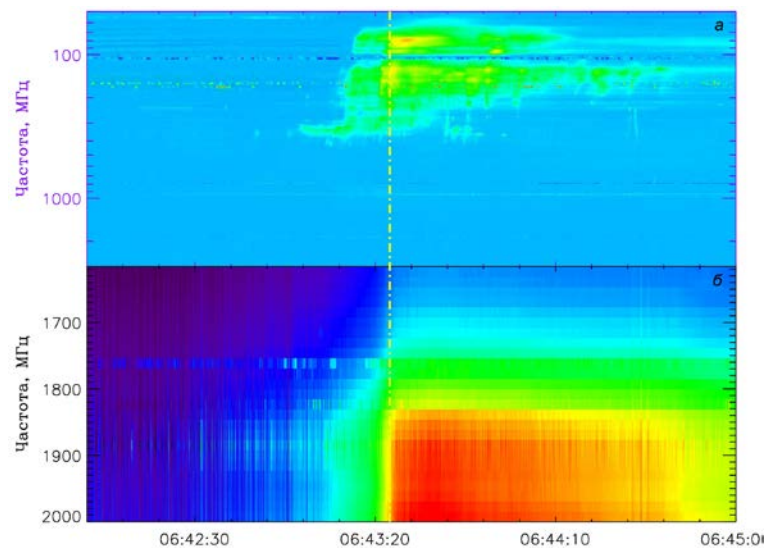


Рис. 8. Динамический спектр: *а* — данные спектрополяриметра СОИАРСПЕЛ 50-3000 МГц; *б* — данные MUSER-I. Вертикальная линия — момент пика жесткого рентгеновского излучения в 06:43:24

лении. С развитием вспышки жгуты уярчаются, а после импульсной фазы появляется длинный охватывающий жгут, поднимающийся со временем вверх. Одновременно с подъемом этого жгута видно течение плазмы вдоль внешнего шипа. Подобная схема инициации коронального выброса массы была предложена в статье [Uralov et al., 2002]. Для объяснения инициации вспышек с круговыми лентами она использовалась в [Meshalkina et al., 2009].

В нашем событии размеры диаграммы направленности СРГ были сравнимы с размерами ядра вспышки, что не позволяет исследовать процесс взаимодействия жгутов в микроволновом излучении подробнее. Регистрация источников поляризованного излучения разных знаков в импульсной фазе согласуется с предположением о формировании общего жгута (см. рис. 4). Положение и яркость наблюдаемых источников поляризованного излучения являются результатом свертки реальных источников с диаграммой СРГ. Как следствие, на радиокартах расстояние между видимыми центрами яркости поляризованных источников уменьшается с ростом частоты приема, т. е. зависит от размеров диаграммы направленности. На наибольшей частоте картографирования данной работы 12.2 ГГц пространственное разрешение СРГ (10.4×18.2 угл. сек) было недостаточно для определения реального положения поляризованных источников.

После импульсной фазы наблюдалось течение плазмы по большим петлям, ориентированным вдоль внешнего шипа. Петли можно было наблюдать на разностных изображениях КУФ-излучения через несколько минут после импульсной фазы. На рис. 3 видно, что их наблюдаемая форма и положение удаленного основания близки к силовым линиям поля, рассчитанного в потенциальном приближении. Из расчетов следует, что высота петель находится в пределах 50–130 Мм при длине 300–400 Мм. Для заполнения петель плазмой за 4 мин скорость ее течения должна быть в несколько раз выше скорости в кар-

тинной плоскости 330 км/с. Оценки показывают, что необходимая величина скорости течения может достигаться, если она составляет порядка скорости ионного звука при температуре плазмы в ядре вспышки 20–30 МК. Подобный механизм распространения с формированием тепловой волны замещения обсуждался в работах [Brown et al., 1979; Vlahos, Papadopoulos, 1979; Levin, Melnikov, 1993; Мешалкина, Алтынцев, 2024].

Пик излучения удаленного источника в микроволнах отстает от пика в ядре вспышки на ~ 5 с. Спектр излучения удаленного источника является широкополосным с максимумом спектра на частоте ниже 4 ГГц. Точность определения задержки по данным СРГ ~ 1 с, поскольку измерения СРГ в удаленном источнике проводились с периодичностью 3.5 с. В ядре вспышки точность определения пика по профилю 35 ГГц составляла доли секунды. При средней длине петли 350 Мм получаем скорость пролета излучающих электронов $\sim 7 \cdot 10^9$ см/с. Кинетическая энергия электронов с такой скоростью ~ 17 кэВ недостаточна для генерации микроволнового спектра удаленного источника. Если учесть (как часто делают [Aschwanden, 2004]), спиральность магнитных силовых линий и питч-угол распространяющихся электронов, оценку скорости можно умножить на 2, тогда энергия электронов становится более разумной — ~ 70 кэВ. Отметим, что единственный раз подобная оценка была получена для удаленного источника круговой вспышки во время наблюдений квазипериодических колебаний, наблюдавшихся на ССРТ с высоким временным разрешением [Altynsev et al., 2022]. В этой работе была получена оценка энергии излучающих электронов выше 100 кэВ.

При достаточно больших питч-углах электронов, распространяющихся вдоль больших петель естественно ожидать их захват в вершинах петель. Их излучением можно объяснить отклик на вспышку на динамических спектрах в диапазоне 80–350 МГц. Если принять, что излучение является плазменным,

плотность плазмы в вершинах петель изменяется в широком диапазоне от $8 \cdot 10^7$ до $1.5 \cdot 10^9$ см⁻³. Расчеты дают магнитные поля 10–20 Гс, т. е. наблюдаемые частоты находятся в пределах 3–6 гармоник циклотронной частоты электронов. В этом случае естественно ожидать генерацию излучения на двойном плазменном резонансе [Ledenev, 1998; Zheleznyakov et al., 2016].

В ядре вспышки и удаленном источнике спектры имеют форму гиросинхротронного с разными индексами степенного спада f^{β} . Более жесткий спектр с показателем $\beta = -1.1$ наблюдался в удаленном источнике. Оценка степенного показателя распределения электронов по энергиям δ по формуле $\beta = 1.22 - 0.9\delta$ [Dulk, Marsh, 1982] дает $\delta \approx 2.5$. Особенностью микроволнового излучения удаленного источника является высокая степень круговой поляризации до 80 %. Согласно расчетам гиросинхротронного спектра в работе [Fleishman, Melnikov, 2003], такая высокая степень поляризации указывает на большиеpitch-углы излучающих электронов. С другой стороны, при больших pitch-углах полученная выше оценка для изотропного распределения электронов $\delta \approx 2.5$ может рассматриваться только в качестве первого приближения и требует уточнения.

Для ядра вспышки наблюдения спектрополяриметрами дали оценку показателя наклона спектра $\beta \approx -2.5$, откуда получаем $\delta \approx 4.1$. К сожалению, наблюдения СРГ были доступны до частоты 12.2 ГГц, т. е. только на восходящей части спектра. Индекс степенного роста $\beta \approx 1.4$ в два раза меньше расчетного значения гиросинхротронного спектра, излучаемого однородным источником.

Короткие фронты роста и спада жесткого пика микроволнового и жесткого рентгеновского излучения показывают, что ускорение до энергий выше 100 кэВ происходило в открытой конфигурации магнитного поля. Потоки излучения электронов меньших энергий растут после пика, что указывает на удержание и накопление в жгутках магнитного поля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдения в микроволновом излучении дали важные знания о морфологических свойствах круговой вспышки 25 марта 2024 г. Показано, что жесткое излучение вспышки связано с процессом взаимодействия магнитных жгутов. Впервые получен микроволновый спектр излучения электронов в удаленном источнике и установлена связь метрового излучения с ускорением электронов в ядре вспышки. Таким образом, продемонстрирован высокий диагностический потенциал многоволновых наблюдений СРГ для исследования событий с относительно малыми временными и пространственными масштабами. Подробное исследование динамики микроволновых источников и их поляризационных и спектральных свойств в данной вспышке будет являться предметом нашей будущей работы.

Авторы благодарны А.А. Кузнецову за полезные обсуждения. Мешалкина Н.С., Чэнмин Тань благодарят PIFI Group grant (2025PG0008). Благодарим

также команды SDO, GOES, обсерватории Нобеяма, RHESSI, Fermi, RSTN, CBS, MUSER, Радиоастрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН за предоставленные данные. Результаты получены с использованием Уникальной научной установки «Радиогелиограф» [<https://ckp-rf.ru/catalog/usu/4138190/>] и оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-angara.iszf.irk.ru/>].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алтынцев А.Т., Лесовой С.В., Глоба М.В. и др. Многоволновый Сибирский радиогелиограф. *Солнечно-земная физика*. 2020, т. 6, № 2, с. 37–50. DOI: [10.12737/szf-62202003](https://doi.org/10.12737/szf-62202003) / Altyntsev A., Lesovoi S., Globa M., Gubin A., Kochanov A., Grechnev V., Ivanov E., Kobets V., Meshalkina N., et al. Multiwave Siberian Radioheliograph. *Sol.-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, iss. 2, p. 30. DOI: [10.12737/stp-62202003](https://doi.org/10.12737/stp-62202003).
- Лесовой С.В., Кобец В.С. Корреляционные кривые Сибирского радиогелиографа. *Солнечно-земная физика*. 2017, т. 3, № 1, с. 17–21. DOI: [10.12737/23588](https://doi.org/10.12737/23588) / Lesovoi S.V., Kobets V. Correlation plots of the Siberian Radioheliograph. *Sol.-Terr. Phys.* 2017, vol. 3, iss. 1. pp. 19–25. DOI: [10.12737/article_58f96eeb8fa318.06122835](https://doi.org/10.12737/article_58f96eeb8fa318.06122835).
- Мешалкина Н.С., Алтынцев А.Т. Проявления нагрева в начале вспышки 29 июня 2012 г. *Солнечно-земная физика*. 2024, т. 10, № 3, с. 13–20. DOI: [10.12737/szf-103202402](https://doi.org/10.12737/szf-103202402) / Meshalkina N.S., Altyntsev A.T. Heating manifestations at the onset of the 29 June 2012 flare. *Sol.-Terr. Phys.* 2024, vol. 10, iss. 3, pp. 11–17. DOI: [10.12737/stp-103202402](https://doi.org/10.12737/stp-103202402).
- Altyntsev A.T., Meshalkina N.S., Sych R.A., Kolotkov D.Y. Double peak quasi-periodic pulsations in a circular-ribbon flare. *Astron. Astrophys.* 2022, vol. 663, id. A149, 8 p. DOI: [10.1051/0004-6361/202243144](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243144).
- Aschwanden M.J. *Physics of the Solar Corona: An Introduction*. Springer-Verlag; Praxis, 2004, 842 p.
- Brown J.C., Melrose D.B., Spicer, D.S. Production of a collisionless conduction front by rapid coronal heating and its role in solar hard X-ray bursts. *Astrophys. J.* 1979, part 1, vol. 228, pp. 592–597. DOI: [10.1086/156883](https://doi.org/10.1086/156883).
- Chen X., Yan Y., Tan B., et al. Quasi-periodic pulsations before and during a solar flare in AR 12242. *Astrophys. J.* 2019, vol. 878, no. 2, p. 78. DOI: [10.3847/1538-4357/ab1d64](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab1d64).
- Dulk G.A., Marsh K.A. Simplified expressions for the gyro-synchrotron radiation from mildly relativistic, nonthermal and thermal electrons. *Astrophys. J.* 1982, vol. 259, p. 350. DOI: [10.1086/160171](https://doi.org/10.1086/160171).
- Fleishman G.D., Melnikov V.F. Gyrosynchrotron emission from anisotropic electron distributions. *Astrophys. J.* 2003, vol. 587, iss. 2, pp. 823–835. DOI: [10.1086/368252](https://doi.org/10.1086/368252).
- Guidice D.A., Cliver E.W., Barron W.R., Kahler S. The Air Force RSTN System. *Bull. of the American Astronomical Society*. 1981, vol. 13, p. 553.
- Kumar P., Nakariakov V.M., Cho K.S. Observation of a quasi-periodic pulsation in hard X-ray, radio, and extreme-ultraviolet wavelengths. *Astrophys. J.* 2016, vol. 822, no. 1, p. 7. DOI: [10.3847/0004-637X/822/1/7](https://doi.org/10.3847/0004-637X/822/1/7).
- Ledenev V.G. Generation of electromagnetic radiation by an electron beam with a bump on the tail distribution function. *Solar Phys.* 1998, vol. 179, iss. 2, pp. 405–420. DOI: [10.1023/A:1005007026541](https://doi.org/10.1023/A:1005007026541).
- Lee J., White S.M., Chen X., et al. Microwave study of a solar circular ribbon flare. *Astrophys. J. Lett.* 2020, vol. 901, p. L10. DOI: [10.3847/2041-8213/abb4dd](https://doi.org/10.3847/2041-8213/abb4dd).

- 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, pp. 17–40. 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, article id. 864–868. DOI: [10.48550/arXiv.1403.4748](https://doi.org/10.48550/arXiv.1403.4748).
- Levin B.N., Melnikov V.F. Quasi-linear model for the plasma mechanism of narrow-band microwave burst generation. *Solar Phys.* 1993, vol. 148, iss. 2, pp. 325–340. DOI: [10.1007/BF00645093](https://doi.org/10.1007/BF00645093).
- Masson S., Pariat E., Aulanier G., Schrijver C.J. The nature of flare ribbons in coronal null-point topology. *Astrophys. J.* 2009, vol. 700, iss.1, pp. 559–578. DOI: [10.1088/0004-637X/700/1/559](https://doi.org/10.1088/0004-637X/700/1/559).
- 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., Uralov A.M., Grechnev V.V., et al. Eruptions of magnetic ropes in two homologous solar events of 2002 June 1 and 2: a key to understanding an enigmatic flare. *PASJ.* 2009, vol. 61, p. 791. DOI: [10.1093/pasj/61.4.791](https://doi.org/10.1093/pasj/61.4.791).
- Nakajima H., Nishio M., Enome S., et al. The Nobeyama Radioheliograph. *Proc. IEEE.* 1994, vol. 82, p. 705.
- Pontin D.I., Priest E.R., Galsgaard K. On the nature of reconnection at a solar coronal null point above a separatrix dome. *Astrophys. J.* 2013, vol. 774, iss. 2, article id. 154, 10 p. DOI: [10.1088/0004-637X/774/2/154](https://doi.org/10.1088/0004-637X/774/2/154).
- Priest E.R., Titov V.S. Magnetic reconnection at three-dimensional null points. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series.* 1996, vol. A354(1721), pp. 2951–2992. DOI: [10.1098/rsta.1996.0136](https://doi.org/10.1098/rsta.1996.0136).
- Shang Z., Xu K., Liu Y., et al. A broadband solar radio dynamic spectrometer working in the millimeter-wave band. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2022, vol. 258, p. 25. DOI: [10.3847/1538-4365/ac4257](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ac4257).
- Shang Z., Wu Z., Liu Y., et al. The calibration of the 35–40 GHz solar radio spectrometer with the new moon and a noise source. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2023, vol. 268, p. 45. DOI: [10.3847/1538-4365/acee00](https://doi.org/10.3847/1538-4365/acee00).
- Sun X., Hoeksema J.T., Liu Y., et al. Hot Spine Loops and the Nature of a Late-phase Solar Flare. *Astrophys. J.* 2013, vol. 778, iss. 2, p. 139. DOI: [10.1088/0004-637X/778/2/139](https://doi.org/10.1088/0004-637X/778/2/139).
- Tan C.M., Yan Y.H., Tan B.L., et al. Study of calibration of solar radio spectrometers and the quiet-Sun radio emission. *Astrophys. J.* 2015, vol. 808, p. 61. DOI: [10.1088/0004-637X/808/1/61](https://doi.org/10.1088/0004-637X/808/1/61).
- Torii C., Tsukiji Y., Kobayashi S., et al. Full-automatic radio-polarimeters for solar patrol at microwave frequencies. *Proc. of the Research Institute of Atmospherics.* Nagoya University, 1979, vol. 26, pp. 129–132.
- Uralov A.M., Lesovoi S.V., Zandanov V.G., Grechnev V.V. Dual-filament initiation of a coronal mass ejection: observations and model. *Solar Phys.* 2002, vol. 208, iss. 1, pp. 69–90. DOI: [10.1023/A:1019610614255](https://doi.org/10.1023/A:1019610614255).
- Vlahos L., Papadopoulos K. On the upconversion of ion-sound to Langmuir turbulence. *Astrophys. J.* 1979, Part 2. Letters to the Editor, vol. 234, Dec. 15, 1979, pp. L217, L218. Navy-supported research. DOI: [10.1086/183143](https://doi.org/10.1086/183143).
- Yan Y., Zhang J., Wang W., et al. The Chinese Spectral Radioheliograph — CSRH. *Earth, Moon, and Planets.* 2009, vol. 104, iss. 1-4, pp. 97–100. DOI: [10.1007/s11038-008-9254-y](https://doi.org/10.1007/s11038-008-9254-y).
- Yan Yihua, Chen Linjie, Yu Sijie. First radio burst imaging observation from Mingantu Ultrawide Spectral Radioheliograph. *IAUS.* 2016, vol. 320, pp. 427–435. DOI: [10.1017/S174392131600051X](https://doi.org/10.1017/S174392131600051X).
- Wang Wei, Yan Yihua, Liu D., et al. Calibration and data processing for a Chinese Spectral Radioheliograph in the decimeter wave range. *Publications Astronomical Society Japan.* 2013, vol. 65, iss. SP1, id. S18. DOI: [10.1093/pasj/65.sp1.S18](https://doi.org/10.1093/pasj/65.sp1.S18).
- Zhang Q. Circular-ribbon flares and the related activities. *Rev. Modern Plasma Physics.* 2024, vol. 8, iss. 1, article id. 7. DOI: [10.1007/s41614-024-00144-9](https://doi.org/10.1007/s41614-024-00144-9).
- Zhdanov D.A., Zandanov V.G. Broadband microwave spectropolarimeter. *Central European Astrophysical Bull.* 2011, vol. 35, p. 223.
- Zheleznyakov V.V., Zlotnik E.Ya., Zaitsev V.V., Shaposhnikov V.E. Double plasma resonance and its manifestations in radio astronomy. *Physics-Uspekhi.* 2016, vol. 59, no. 10. DOI: [10.3367/UFNe.2016.05.037813](https://doi.org/10.3367/UFNe.2016.05.037813).
- URL: <https://radiomag.iszf.irk.ru/books/sibirskii-radiogeliograf/page/sintez-radioizobrazhenii-s-pomoshhiu-paketa-srh-synth> (дата обращения 25 июня 2025 г.).
- URL: <https://badary.iszf.irk.ru/srhCorrPlot.php> (дата обращения 25 июня 2025 г.).
- URL: <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/4138190/> (дата обращения 25 июня 2025 г.).
- URL: <http://ckp-angara.iszf.irk.ru/> (дата обращения 25 июня 2025 г.).

Статья подготовлена по материалам Двадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 10–14 февраля 2025 г., Институт космических исследований РАН, Москва, Russia.

Как цитировать эту статью:

Алтынцев А.Т., Мешалкина Н.С., Анфиногентов С.А., Жданов Д.А., Мышьяков И.И., Иванов Е.Ф., Чэнмин Тань, Чжао У. Процессы ускорения и переноса электронов в импульсной круговой ленточной вспышке. *Солнечно-земная физика.* 2025, т. 11, № 3, с. 5–15. DOI: [10.12737/szf-113202501](https://doi.org/10.12737/szf-113202501).