

ПРОЯВЛЕНИЯ НАГРЕВА В НАЧАЛЕ ВСПЫШКИ 29 ИЮНЯ 2012 Г.**HEATING MANIFESTATIONS AT THE ONSET OF THE 29 JUNE 2012 FLARE****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. Анализ данных GOES для вспышки SOL2012-06-29T04:09 класса C4.6 показывает тепловой характер энерговыделения в течение нескольких минут перед импульсной стадией. Нагрев плазмы до температур выше 10 МК приводит к появлению струй плазмы вдоль открытых силовых линий и в больших петлях. В работе исследуется взаимосвязь нагретой плазмы со вспышечной структурой и ее динамикой по данным наблюдений в рентгеновском, крайнем ультрафиолетовом и радиоволновом диапазонах.

Особое внимание привлекает обнаружение на динамических спектрах тонких временных структур узкополосного радиоизлучения до и после импульсной стадии вспышки. На начальной стадии наблюдаются широкополосные импульсы в дециметровом диапазоне, которые можно связать с формированием тепловых фронтов в струях. Серия сверхярких всплесков в сантиметровом диапазоне, характеризующихся частотным дрейфом, наблюдается после окончания импульсного энерговыделения в ядре вспышки. По данным Сибирского солнечного радиотелескопа (5.7 ГГц) было установлено, что источники этих субсекундных всплесков находятся в удаленном основании крупномасштабной вспышечной петли.

Ключевые слова: Солнце, тонкая временная структура, механизмы нагрева, микроволновые всплески, когерентное излучение, тепловой фронт, эффект Ньюперта.

Abstract. Analysis of GOES data for the SOL2012-06-29T04:09 flare, class C4.6, shows a thermal character of the energy release for several minutes before the impulsive stage. Plasma heating to temperatures above 10 MK leads to the appearance of plasma jets along open field lines and in large loops. This work examines the relationship between the heated plasma and the flare structure and its dynamics, using observations in the X-ray, extreme ultraviolet (EUV), and radio-wave ranges.

Particular attention is drawn to the detection of narrow-band fine temporal structures of radio emission before and after the impulsive stage of the flare in dynamic spectra. In the initial stage, broadband pulses in the decimeter range are observed which can be associated with the formation of thermal fronts in the jets. A series of super-bright drifting bursts in the centimeter range occurs after the end of the impulsive energy release in the flare core. Using data from the Siberian Solar Radio Telescope (5.7 GHz), we managed to localize the position of the source of the fine structure of drifting bursts at the remote footpoint of the large-scale flare loop.

Keywords: Sun, fine temporal structure, heating mechanisms, microwave bursts, coherent emission, thermal front, Neupert effect.

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что активность в области вспышки во многих случаях проявляется задолго до импульсного энерговыделения на главной фазе, хотя она не обсуждается в широко принятом сценарии вспышки — CSHKP [Carmichael, 1964; Sturrock, 1966; Hirayama, 1974; Корп, Pneuman, 1976]. В модели CSHKP происходит внезапное высвобождение магнитной энергии в короне благодаря магнитному пересоединению, и значительная часть энергии преобразуется в кинетическую энергию плазмы и высокоэнергичных частиц, распространяющихся вдоль магнитных силовых линий. Электроны бомбардируют достаточно плотную хромосферу и переходную зону, генерируя тормозное излучение, которое наблюдается в жестком рентгеновском (HXR) излу-

чении. В результате этого так называемого хромосферного испарения плазма нагревается, поднимается и заполняет петлю, и мы наблюдаем мягкое рентгеновское (SXR) излучение горячей плазмы, как правило, в вершине вспышечной петли.

Эффект Ньюперта [Neupert, 1968], которому соответствует модель вспышки CSHKP, объясняет взаимосвязь между мягким и жестким рентгеновским излучением. Этот эффект предполагает, что нетепловое рентгеновское излучение генерируется непосредственно пучками электронов, а тепловое мягкое рентгеновское излучение — горячей плазмой, нагретой энергией тех же пучков электронов. Эта горячая плазма впоследствии испаряется и накапливается в короне (например, [Veronig et al., 2005]). Хотя данные наблюдений подтверждают достоверность эффекта Ньюперта, предыдущие статистиче-

ские исследования показали, что он может нарушаться в значительной доле событий. При тестировании по задержкам между всплесками SXR и HXR было обнаружено, что до половины событий показывает несоответствия с этим эффектом (например, [Dennis, Zarro, 1993; McTiernan et al., 1999]).

Довольно очевидное отклонение от эффекта Ньюперта возникает, когда SXR наблюдается перед HXR, что может указывать на наличие тепловой плазмы, которая нагрета не только ускоренными электронами [Acton et al., 1992]. Согласно работе [Dennis, 1988], отсутствие энергичных рентгеновских лучей может быть связано с чувствительностью порога детекторов HXR, однако исследования [Benz et al., 1983; Jiang et al., 2006] показывают, что данное явление не может быть объяснено отсутствием чувствительности к HXR [Benz, 2017]. Статистическое исследование 503 вспышек [Veronig et al., 2002a] показало, что предварительный нагрев наблюдается в SXR до начала импульсной фазы (обнаруженной в HXR) более чем в 90 % событий. Кроме того, Veronig et al. [2002b] не обнаружили корреляции между длительностью предварительного нагрева и интенсивностью последующей вспышки. Эти данные свидетельствуют о том, что эффект Ньюперта нарушается более чем в половине событий, по крайней мере во время ранней фазы вспышки, независимо от интенсивности вспышки. О SXR в короне до импульсной фазы также сообщалось в других исследованиях [Caspi, Lin, 2010; Caspi et al., 2014, 2015]. Эти исследования подтверждают, что для объяснения SXR перед импульсной фазой необходимо привлечение дополнительных физических механизмов нагрева, а не только за счет ускоренных электронов.

Hudson et al. [2021] обнаружили на самых ранних стадиях солнечных вспышек разной мощности общее поведение температуры плазмы: плазма с температурой 10–15 МК появляется сразу, без каких-либо признаков постепенного роста температуры, перед всплеском HXR. Горячие источники излучения находились в основаниях низких петель. Авторы заключили, что их нагрев не объясняется потоками нетепловых электронов.

В работе [Battaglia et al., 2009] авторы изучили предвспышечную фазу нескольких солнечных вспышек, когда на кривых блеска по данным спутника RHESSI наблюдался подъем SXR, но не было обнаружено отклика HXR в канале 12–25 кэВ. Авторы объяснили нагрев механизмом теплопроводности. В работе [Altyntsev et al., 2012] мы обнаружили слабые потоки нетепловых электронов по микроволновым наблюдениям, которые имелись для двух из четырех рассмотренных событий. Таким образом, радионаблюдения являются более чувствительным методом детектирования нетепловых электронов в разреженной плазме солнечной короны.

В работе [Battaglia et al., 2023] рассмотрены вспышки с горячими источниками от 10 до 16 МК, появившимися на начальной фазе. Изображения, полученные STIX и AIA, показали, что компактные источники находятся не в вершинах петель, и нагрев наблюдается задолго до появления HXR.

В данной работе мы выполнили детальный анализ вспышки 29 июня 2012 г. по многоволновым

наблюдениям. Целью работы было определение взаимосвязи только что нагретой плазмы со вспышечной структурой и ее динамикой на ранней стадии вспышки 29 июня 2012 г. Это событие необычно тем, что на ранней фазе наблюдается истечение тепловой плазмы с высокими температурами до 12 МК, когда еще нет отклика ни в радиодиапазоне, ни в жестком рентгеновском излучении. Кроме того, на спаде вспышки в микроволновом излучении наблюдалась тонкая временная структура, что необычно. Источники субсекундных импульсов (ССИ) были расположены на значительном расстоянии от основного источника энерговыделения вспышки.

ИНСТРУМЕНТЫ И МЕТОДЫ

Данные о спектральных и пространственных характеристиках крайнего ультрафиолетового (КУФ) излучения взяты из архива Solar Dynamic Observatory (SDO; [Pesnell et al., 2012]). Использовались изображения полного солнечного диска AIA, записываемые каждые 12 с с пространственным разрешением 0.6" [Lemen et al., 2012].

Кривые блеска с временным разрешением 100 мс и 4 с для изучения временной структуры рентгеновского излучения, а также изображения с разрешением 4 с получены по данным RHESSI [Lin et al., 2002].

Для регистрации нетеплового излучения использовались данные Сибирского солнечного радиотелескопа (ССРТ), в первую очередь одномерные (1D) сканы диска Солнца на частоте 5.7 ГГц с временным разрешением 14 мс [Grechnev et al., 2003; Meshalkina et al., 2012]. Ширина диаграммы направленности на полувысоте составляла 17.8" и 19.3" в направлениях восток–запад (ВЗ/ЕВ) и север–юг (СЮ/НС) соответственно. Короткие всплески длительностью менее секунды (субсекундные импульсы, ССИ) выявлялись с помощью последовательности сканов ССРТ. 1D-сканы использовались для изучения тонкой временной структуры всплеска в интенсивности и поляризации, а также для локализации источников ССИ на диске. Морфология и местоположение фонового микроволнового всплеска источника в ходе вспышки изучались по двумерным (2D) изображениям солнечного диска, получаемым ССРТ с временным разрешением 2–3 мин [Grechnev et al., 2003; Kochanov et al., 2013].

Использовались также данные Бадарского широкополосного микроволнового спектрополяриметра (БШМС) [Zhdanov, Zandanov, 2011] с диапазоном принимаемых частот 4–8 ГГц и временным разрешением 10 мс.

Исследование динамических спектров в диапазоне 15–2500 МГц проводилось по данным HiRAS (Hiraiso Radio Spectrograph) [Kondo et al., 1995].

Мы использовали также радиоданные спектрополяриметров Нобеяма (Nobeyama Radiopolarimeters, NoRP [Torii et al., 1979]), которые измеряют интенсивность и круговую поляризацию на шести частотах (1, 2, 3.75, 9.4, 17 и 35 ГГц) с временным разрешением 1 с и 100 мс во вспышечном режиме. Пространственное распределение радиовсплеска и вари-

ации интенсивности излучения исследовались по последовательностям изображений, полученным на радиогелиографе Нобеяма (NORH) на частоте 17 ГГц с пространственным разрешением 10'' [Nakajima et al., 1994]. Мы используем также данные радиотелескопа в Palehua (Гавайи), перекрывающиеся по времени с данными NoRP. Телескоп в Palehua входит в USAF Radio Solar Telescope Network (RSTN) [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.

НАБЛЮДЕНИЯ

Вспышка 29 июня 2012 г. произошла 04:09–04:16 UT (здесь и далее используется мировое время) в активной области (АО) 11515, класс вспышки по GOES C4.6. На рис. 1 приведены световые кривые вспышки в рентгеновском, дециметровом и микроволновом излучении.

На начальной фазе вспышки наблюдалось увеличение потока SXR (данные GOES 0.5–8 Å, RHESSI в каналах до 20 кэВ) (см. рис. 1, а, в) после 04:10. Температура плазмы в 04:12 достигает 10 МК, а затем постепенно растет до 15 МК. HXR (рис. 1, з) появилось в 04:13:20 (синяя штрихпунктирная линия), т. е. в этом событии эффект Ньюперта не работал. В дециметровом излучении в каналах RSTN (0.245–1.4 ГГц) наблюдался короткий импульс в 04:12:47, за двадцать секунд до начала основной импульсной фазы (рис. 1, д). Этот импульс наблюдался также на спектрометре HiRAS в диапазоне 50–550 МГц как всплеск III типа, дрейфующий к низким частотам (рис. 2).

Гиротронный микроволновый всплеск задержан относительно HXR на 1.5 с, его спектральный максимум находился около 6–7 ГГц, поток излучения достигал 25 с.е.п.

КУФ-изображения показывают, что энерговыделение вспышки происходит в невысоких петлях (ядро на рис. 3), находящихся в основаниях крупномасштабной петли и открытых силовых линий. Высокая петля наблюдается перед вспышкой. В 04:09 появляются компактные уярчения на изображениях SDO/AIA в канале 304 Å [<http://ru.iszf.irk.ru/~nata/120629/long.mp4>]. Данная длина волны, на которой измеряют относительно невысокие температуры (50000 К), была выбрана потому, что в других каналах AIA было много пересвеченных кадров. Через минуту, в 04:10, начинается истечение плазмы вдоль открытых силовых линий, направленных с запада на восток в картинной плоскости (рис. 4). Со временем яркость этих струй плазмы усиливается. Другая струя появляется в высокой закрытой петле и постепенно достигает удаленного западного основания петли.

Динамика южной струи, по траектории которой проведена голубая штриховая линия, показана на последовательности изображений в канале 304 Å (см. рис. 4). На профилях яркости (рис. 4) видно, что при распространении потока горячей плазмы наблюдается не постепенное нарастание, характерное для диффузии, а в начале струи отделяется укручение размером ~6'', которое можно интерпретировать как квази-

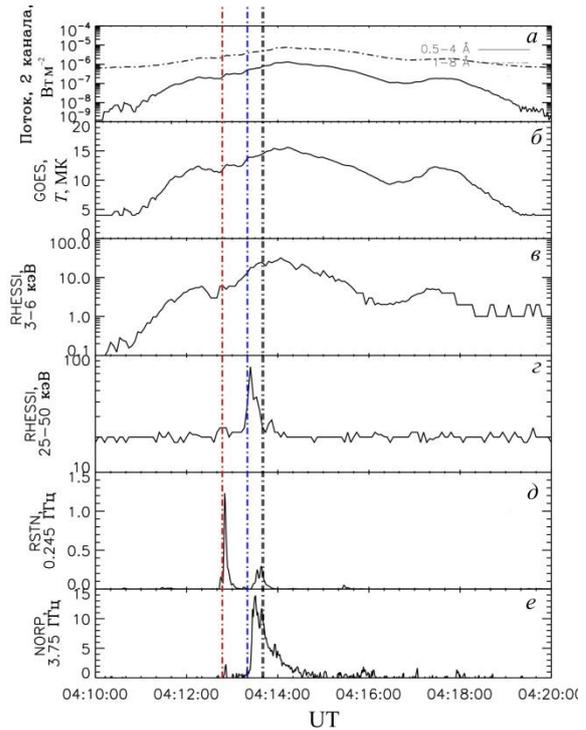


Рис. 1. Событие 29 июня 2012 г.: а — данные GOES, потоки излучения (сплошная кривая — 0.5–4 Å, штрихпунктирная — 1–8 Å); б — данные GOES, профиль температуры; в, з — временные профили HXR в каналах RHESSI 3–6, 25–50 кэВ; д — профиль интенсивности на частоте 0.245 ГГц (RSTN); е — профиль на частоте 3.75 ГГц (NORP). Появление струи зарегистрировано около 04:10. Вертикальные штрихпунктирные линии отмечают: красная — моменты появления дециметровых всплесков (см. рис. 2); синяя — подъем HXR в 04:13:20; черная — интервал с ССИ (04:13:39.4–04:13:41.4)

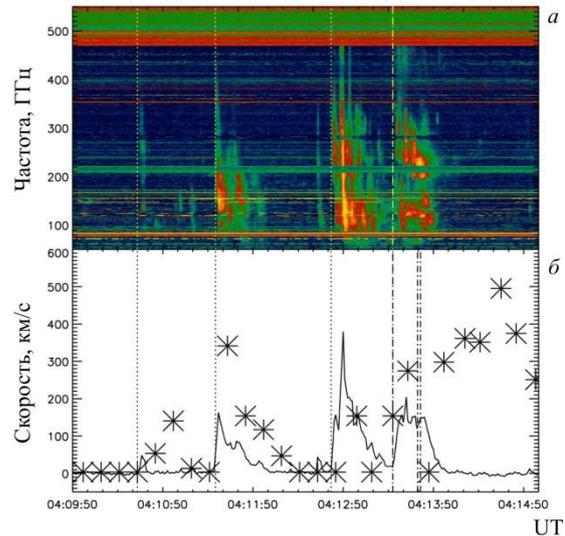


Рис. 2. Событие 29 июня 2012 г.: а — динамический спектр (HiRAS); б — интегральная интенсивность радиоизлучения в диапазоне 50–550 МГц (сплошная кривая). Скорости фронтов тепловых волн, распространяющихся вдоль открытых силовых линий магнитного поля (см. рис. 4), показаны звездочками. Пунктирные линии отмечают моменты начала радиовсплесков, штрихпунктирная линия на обеих панелях — начало всплеска жесткого рентгеновского излучения (04:13:23), две правые штрихпунктирные линии на нижней панели ограничивают интервал с субсекундными всплесками на частоте 5.7 ГГц (04:13:39.4–04:13:41.4)

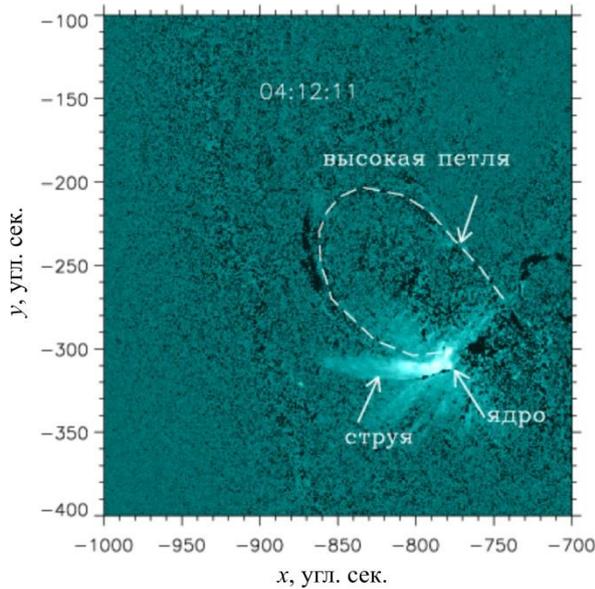


Рис. 3. Крупномасштабная структура вспышечной области. Фон — разница между изображениями в 04:12:11 и в 04:09:35 в канале 131 Å AIA/SDO. Показаны ядро вспышки, струя (spray) и высокая петля, по которой двигалась другая струя

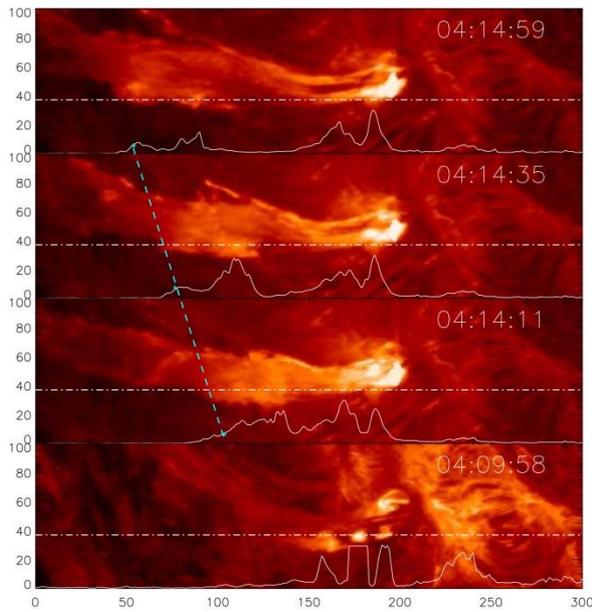


Рис. 4. Изображения в канале 304 Å AIA/SDO для указанных моментов времени. Белые штрихпунктирные линии отмечают горизонтальное сечение изображения. Профиль яркости вдоль сечения показан белым цветом в нижней части каждой панели. Голубая штриховая линия соединяет фронты (скачки яркости) распространяющейся струи. По осям X и Y значения приведены в пикселах

стационарный тепловой фронт. Скорость его движения в интервале от 04:14:11 до 04:14:59 около 400–500 км/с.

КУФ-изображения позволили проследить структуру струй на расстоянии около 60'' от ядра вспышки. Фронты тепловых волн отделялись от ядра вспышки четыре раза, их скорости показаны на рис. 2, б звездами. Сопоставление скоростей фронтов с интенсивностью интегрального по частоте излучения показывает высокую степень корреляции между ними

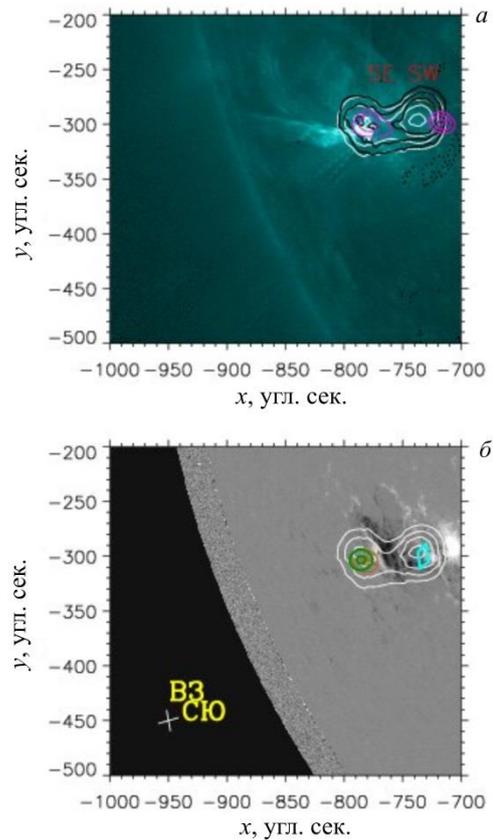


Рис. 5. Изображение в канале 131 Å AIA/SDO в 04:13:47 с наложенными контурами (а): белый — распределение яркостной температуры (0.3, 0.5, 0.7, 0.9 от максимума) на частоте 5.7 ГГц в 04:13; черные — распределение яркостной температуры в поляризации на частоте 5.7 ГГц: сплошной — RCP (0.3, 0.5, 0.7 от максимума), пунктирный — LCP (0.3, 0.5, 0.7 от минимума); розовый — распределение яркостной температуры в интенсивности (0.5, 0.7, 0.9 от максимума) на частоте 17 ГГц в 04:13:40; SE и SW — восточный (ядро) и западный (удаленный) источники соответственно. Магнитограмма HMI/SDO в 04:13:30 (б) с наложенными контурами: белые — то же, что на панели а; оранжевый — данные RHESSI в канале 25–50 кэВ (0.5, 0.9 от максимума); темно-зеленый — данные RHESSI в канале 6–12 кэВ (0.5, 0.9 от максимума); голубая рамка отмечает положение источников ССИ; белый крест в нижнем левом углу — диаграмма направленности ССРТ

во времени. Моменты формирования фронтов близки к моментам регистрации дециметровых всплесков.

На импульсной фазе вспышки наблюдаются всплески НХР и микроволнового излучения. Спектральный максимум микроволнового излучения вспышки находится около 6–7 ГГц, т. е. близко к частоте наблюдений ССРТ. На картах микроволнового излучения на частоте 5.7 ГГц основаниям крупномасштабной петли соответствуют два источника — ядро, или восточный (SE), и удаленный, или западный (SW), показанные на рис. 5 белыми контурами. Поведение яркостных температур в этих источниках в правой и левой поляризации показано на рис. 6. В ядре микроволновое излучение начинается в 04:13:20, т. е. примерно через 3.5 мин после начала нагрева плазмы и появления струи. Степень круговой поляризации излучения ядра не превышает 17%. Фронт нарастания микроволнового сигнала в удаленном источнике

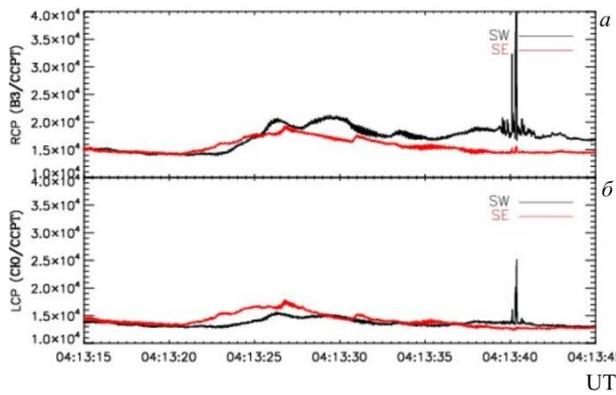


Рис. 6. Профили яркостной температуры в микроволновых источниках на частоте 5.7 ГГц, измеренные с помощью ССРТ, в круговой поляризации: *a* — правая (RCP), *б* — левая (LCP). Красные кривые соответствуют ядру вспышки (SE), черные — удаленному источнику (SW)

отстает на 2.5 с, как было ранее показано в работах [Жданов, Занданов, 2013]. Амплитуда яркостной температуры в удаленном источнике в два раза меньше, чем в ядре. На частоте 17 ГГц компактные источники излучения (розовые контуры) наблюдаются в обоих основаниях высокой петли (см. рис. 5), тогда как удаленный источник слабый и уверенно регистрируется с задержкой 10 с. Источник HXR находится вблизи центра яркости ядра (оранжевые контуры на рис. 5, б).

Особенностью вспышки является серия сверхярких ССИ на частоте приема ССРТ, возникших на спаде микроволнового всплещного всплеска (см. рис. 6). Центры яркости источников ССИ находятся в удаленном источнике, их положение указывает голубой ромб на рис. 5, б. Заметим, что излучение ССИ отличается высокой степенью правой круговой поляризации — до 100 % в некоторых импульсах.

Динамические спектры с тонкой временной структурой отличаются разнообразием типов всплесков: узкополосные бездрейфовые (с шириной полосы <math>< 1\text{ ГГц}</math>); дрейфующие со скоростями около 15.2 ГГц/с в сторону низких частот (рис. 7); с почти симметричным дрейфом в сторону высоких и низких частот со скоростями 5.7 ГГц/с и 11.3 ГГц/с; медленно дрейфующий всплеск (скорость 2.9 ГГц/с) в сторону высоких частот. Дрейфующие всплески имеют различные ширины полосы спектра: от 0.89 до 1.4 ГГц.

ОБСУЖДЕНИЕ

Как свидетельствуют наблюдения, распределения всплещного энерговыделения по каналам (нагреву, ускорению потоков плазмы и частиц) существенно различаются по динамике и относительному вкладу. Для событий с большим вкладом энергии в ускорение электронов характерен эффект Ньюперта. С другой стороны, в некоторых событиях (так называемых тепловых всплещках) ускоренные частицы не наблюдаются в HXR и микроволновом излучении (см., например, [Fleishman et al., 2015]). В исследуемом событии горячая плазма с температурами выше 10 МК появляется на начальной стадии вспышки, а всплеск нетепловых электронов наблюдается на несколько

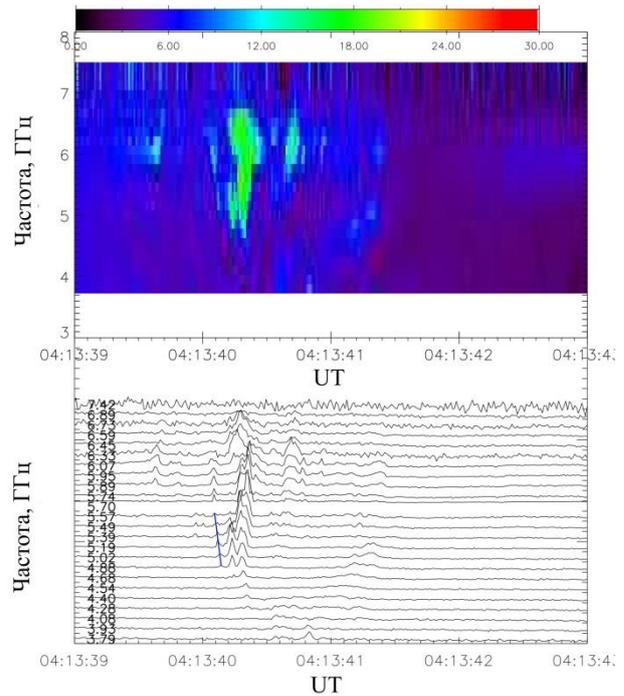


Рис. 7. Динамический спектр (данные БШМС) с тонкой временной структурой (вверху) и соответствующая временная развертка по частотам (внизу, частоты указаны цифрами слева). Синяя линия отмечает всплеск, смещающийся в сторону низких частот

минут позже. Особенностью события является нагрев плазмы до аномально высокой температуры в низких петлях, а также вблизи оснований крупномасштабных петель, что создает благоприятные условия для изучения процесса распространения тепла и плазмы в верхнюю корону. Обсуждение механизма нагрева плазмы вблизи оснований высоких петель выходит за рамки настоящей работы. Можно указать на работы [Liu et al., 2013; Larosa, Moore, 1993; Somov et al., 1998], согласно которым сверхгорячая плазма образуется в турбулентных токовых слоях.

На изображениях SDO/AIA видно, что часть нагретой плазмы в виде струй движется из ядра нагрева по открытым силовым линиям, а часть перемещается вдоль высоких петель (замкнутых в поле зрения) в направлении удаленных оснований. Динамика распределений КУФ-яркости изучалась вдоль открытой силовой линии, ориентированной вдоль широты (см. рис. 2, б и 4). На интервале длительностью около 5 мин от появления струи до окончания импульсной стадии при истечении плазмы выделялись четыре последовательно распространяющихся уярчения с шириной фронта около 4–5 тыс. км. Фронты отделялись от горячего ядра вспышки и двигались со скоростями 300–500 км/с, которые при температуре плазмы 10–15 МК меньше тепловой скорости электронов в 30–40 раз, но в несколько раз выше тепловой скорости ионов.

Торможение расплывания сгустков горячих электронов в холодной плазме наблюдалось ранее в лабораторных экспериментах [Иванов и др., 1969; Иванов, 1977; Manheimer, 1977]. Во вспышках этот эффект впервые наблюдался в работах [Batchelor et al., 1985; Rust et al., 1985]. Теоретическое объясне-

ние формирования скачка тепла между горячей и холодной плазмами, движущегося со скоростью значительно ниже тепловой скорости электронов, было впервые предложено в работе [Ivanov et al., 1970]. Разлет электронов обеспечивается компенсацией уходящего заряда встречным потоком холодных электронов, поскольку ионы не успевают сдвинуться. Следует отметить, что в случае струи в ограниченной по радиусу магнитной трубке в нейтрализацию тока горячих электронов дает также вклад индукционный отклик на поля встречного потока [Hammer, Rostoker, 1970; Lee, Sudan, 1971]. Относительный вклад и динамика этих механизмов нейтрализации обсуждаются в работе [Van den Oord, 1990].

Встречный поток холодных электронов достаточно большой интенсивности может тормозиться вследствие появления аномального сопротивления при возбуждении токовых неустойчивостей. Как было показано аналитически и с помощью численного моделирования [Ivanov et al., 1970; Brown et al., 1979; Smith, Lillequist, 1979; Бардаков, 1985; Arbet, Melnikov, 2009], разлет горячих электронов может привести к образованию стационарно движущегося скачка плотности горячих электронов, который можно интерпретировать как волну замещения, или тепловой фронт. В работе [Бардаков, 1985] было показано, что формируется стационарный фронт скачка потенциала, который движется со скоростью, близкой к ионно-звуковой. Этот результат остается справедливым и в случае изотермической холодной плазмы. Результаты лабораторных экспериментов [Иванов и др., 1969; Иванов, 1977; Manheimer, 1977] также показывают скорости распространения тепловой волны около скорости ионно-звуковой волны с ее зависимостью от квадратного корня из массы ионов плазмы.

Оценим скорость ионно-звуковой волны по формуле [Aschwanden, 2004]

$$V_{зв} = 1.66 \times 10^4 \sqrt{\frac{T}{\mu}},$$

где μ — ионно-протонное соотношение масс. При $\mu(H)=1$ и температуре ядра вспышки $T=10\text{--}15$ МК $V_{зв}=520\text{--}640$ км/с. Наблюдаемые скорости до 300–500 км/с согласуются с этой оценкой, если учесть спад температуры при расширении области с горячими электронами, когда появляется тепловая волна. С уменьшением температуры падает скорость тепловой волны. Продолжительная четвертая волна вызвана импульсной фазой вспышки с большой мощностью энерговыделения.

Тепловой фронт служит преградой для низкоэнергичных электронов. Высокоэнергичная часть электронов нагретой плазмы может проникать через барьер и формировать за ним пучковое распределение, которое генерирует наблюдаемый дрейфующий всплеск дециметрового излучения [Brown et al., 1979; Smith, Lillequist, 1979; Vlahos, Papadopoulos, 1979; Levin, Melnikov, 1993].

Потоки нетепловых электронов появляются во время импульсной стадии вспышки. В максимуме жесткого рентгеновского сигнала индекс степенного спектра электронов достигает значения 3.8, что до-

казывает нетепловой характер всплеска. Спектр микроволнового всплеска имеет вид, характерный для гиротронного излучения. Частота максимума находится около 6 ГГц. Из сравнения временных профилей излучения 5.7 ГГц из ядра и удаленного источника следует оценка времени пролета нетепловых электронов по высокой петле 2.5 с. При длине высокой петли 270'' (см. рис. 3) получаем оценку эффективной скорости электронов около 7.8×10^9 см/с. При учете разброса скоростей электронов по питч-углам и спиральности магнитных силовых линий оценка скорости электронов увеличивается примерно в два раза. В этом случае энергия нетепловых электронов, генерирующих гиротронное излучение в удаленном источнике, не менее 100 кэВ. Поляризация ССИ в удаленном источнике достигает 100 %.

Интересно, что субсекундные импульсы наблюдаются в удаленном источнике на спаде основного всплеска в ядре вспышки. Направление дрейфов частоты ССИ к высоким частотам согласуется с движением излучающих электронов вниз, к западному основанию петли. Возможно, часть электронов отражается, поскольку есть случай с обратным направлением дрейфа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во вспышке 29.06.2012 эффект Ньюперта не наблюдается, т. е. данная вспышка является событием предварительного нагрева, наблюдаемого в мягком рентгеновском излучении до начала импульсной фазы, обнаруживаемой позже в жестком рентгеновском излучении.

Тепловые волны формируются при нагреве локальной области плазмы уже на начальной фазе вспышки и проявляются в виде эрупции струи. Скорость истечения тепловой плазмы при эрупции струи вдоль открытой магнитной силовой линии (как канала, удерживающего плазму) значительно превышает тепловую скорость ионов и достигает значений порядка скорости ионно-звуковой волны.

Тонкая временная структура в микроволновом излучении наблюдалась на фазе спада вспышки. Примечательно, что источники ССИ были удалены от главного источника вспышки, где произошло основное энерговыделение и наблюдалось жесткое рентгеновское излучение. Как правило, ССИ находятся в непосредственной близости от места основного энерговыделения. Полученные результаты демонстрируют важность наблюдений с пространственным разрешением.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-12-00308. Раздел об анализе данных ССРТ и тонкой структуре (Н.С.М.) выполнен при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках базового финансирования программы П.16.3.2 «Нестационарные и волновые процессы в солнечной атмосфере».

Авторы благодарны Жданову Д.А. за помощь в подготовке данных БШМС. Благодарим также команды Солнечной динамической обсерватории, GOES, HiRAS, обсерватории Нобеймы, RHESSI,

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/>], оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-angara.iszf.irk.ru/>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бардаков В.М. Структура тепловой волны в бесстолкновительной плазме. *Физика плазмы*. 1985. Т. 11, № 10. С. 1223–1230.

Жданов Д.А., Занданов В.Г. Первые микроволновые спектральные наблюдения двух источников во время солнечной вспышки. *БШФФ-2013. Секция А: Астрофизика и физика Солнца*. 2013. С. 70–71.

Иванов А.А. *Физика сильнонеравновесной плазмы*. М.: Атомиздат, 1977. 352 с.

Иванов А.А., Козоровицкий Л.Л., Русанов В.Д. Распространение тепла в плазме вдоль магнитного поля (волна замещения). *Докл. АН СССР*. 1969. Т. 184, № 4. С. 811–814.

Acton L.W., Feldman U., Bruner M.E., et al. The morphology of 20×10^6 K plasma in large non-impulsive solar flares. *Publ. Astron. Soc. Japan*. 1992. Vol. 44. P. L71–L75.

Altyntsev A.A., 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, iss. 2, 138. 12 p. DOI: [10.1088/0004-637X/758/2/138](https://doi.org/10.1088/0004-637X/758/2/138).

Arber T.D., Melnikov V.F. Thermal fronts in flaring magnetic loops. *Astrophys. J.* 2009. Vol. 690, iss. 1. P. 238–243. DOI: [10.1088/0004-637X/690/1/238](https://doi.org/10.1088/0004-637X/690/1/238).

Aschwanden M.J. *Physics of the Solar Corona: An Introduction*. Springer-Verlag; Praxis, 2004. 842 p.

Batchelor D.A., Crannell C.J.; Wiehl H.J., Magun A. Evidence for collisionless conduction fronts in impulsive solar flares. *Astrophys. J.* 1985. Vol. 295. P. 258–264. DOI: [10.1086/163370](https://doi.org/10.1086/163370).

Battaglia M., Fletcher L., Benz A.O. Observations of conduction driven evaporation in the early rise phase of solar flares. *Astron. Astrophys.* 2009. Vol. 498, iss. 3. P. 891–900. DOI: [10.1051/0004-6361/200811196](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200811196).

Battaglia A.F., Hudson H., Warmuth A., et al. The existence of hot X-ray onsets in solar flares. *Astron. Astrophys.* 2023. Vol. 679, id. A139. 14. p. DOI: [10.1051/0004-6361/202347706](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202347706).

Benz A.O. Flare observations. *Living Rev. Sol. Phys.* 2017. Vol. 14, 2. 59 p. DOI: [10.1007/s41116-016-0004-3](https://doi.org/10.1007/s41116-016-0004-3).

Benz A.O., Barrow C.H., Dennis B.R., et al. X-ray and radio emissions in the early stages of solar flares. *Solar Phys.* 1983. Vol. 83. P. 267–283. DOI: [10.1007/BF00148280](https://doi.org/10.1007/BF00148280).

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. Vol. 228. P. 592–597. DOI: [10.1086/156883](https://doi.org/10.1086/156883).

Carmichael H.A. Process for flares. *The Physics of Solar Flares: Proceedings of the AAS-NASA Symposium*. 1964. P. 451–456.

Caspi A., Lin R.P. RHESSI line and continuum observations of super-hot flare plasma. *Astrophys. J.* 2010. Vol. 725, iss. 2. P. L161–L166. DOI: [10.1088/2041-8205/725/2/L161](https://doi.org/10.1088/2041-8205/725/2/L161).

Caspi A., Krucker S., Lin R.P. Statistical properties of super-hot solar flares. *Astrophys. J.* 2014. Vol. 781, 43. 11 p. DOI: [10.1088/0004-637X/781/1/43](https://doi.org/10.1088/0004-637X/781/1/43).

Caspi A., Shih A.Y., McTiernan J.M., Krucker S. Hard X-ray imaging of individual spectral components in solar flares. *Astrophys. J.* 2015. Vol. 811, iss. 1, L1. 8 p. DOI: [10.1088/2041-8205/811/1/L1](https://doi.org/10.1088/2041-8205/811/1/L1).

Dennis B.R. Solar flare hard X-ray observations. *Solar Phys.* 1988. Vol. 118, iss. 1-2. P. 49–94. DOI: [10.1007/BF00148588](https://doi.org/10.1007/BF00148588).

Dennis B.R., Zarro D.M. The Neupert effect: What can it tell up about the impulsive and gradual phases of solar flares. *Solar Phys.* 1993. Vol. 146. P. 177–190. DOI: [10.1007/BF00662178](https://doi.org/10.1007/BF00662178).

Fleishman G.D., Nita G.M., Gary D.E. Energy partitions and evolution in a purely thermal solar flare. *Astrophys. J.* 2015. Vol. 802, iss. 2, 122. 13 p. DOI: [10.1088/0004-637X/802/2/122](https://doi.org/10.1088/0004-637X/802/2/122).

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. *Bulletin of the American Astronomical Society*. 1981. Vol. 13. P. 553.

Hammer D.A., Rostoker N. Propagation of high current relativistic electron beams. *Physics of Fluids*. 1970. Vol. 13. P. 1831–1850. DOI: [10.1063/1.1693161](https://doi.org/10.1063/1.1693161).

Hirayama T. Theoretical model of flares and prominences. I. Evaporating flare model. *Solar Phys.* 1974. Vol. 34, iss. 2. P. 323–338. DOI: [10.1007/BF00153671](https://doi.org/10.1007/BF00153671).

Hudson H.S., Simões Paulo J.A., Fletcher Lyndsay et al. Hot X-ray onsets of solar flares. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2021. Vol. 501, iss. 1. P. 1273–1281. DOI: [10.1093/mnras/staa3664](https://doi.org/10.1093/mnras/staa3664).

Ivanov A.A., Rusanov V.D., Sagdeev R.Z. Electron shock waves in a collisionless plasma. *Soviet JETP Letters*. 1970. Vol. 20. P. 20.

Jiang Y.W., Liu S., Liu W., Petrosian V. Evolution of the loop-top source of solar flares: Heating and cooling processes. *Astrophys. J.* 2006. Vol. 638. P. 1140–1153. DOI: [10.1086/498863](https://doi.org/10.1086/498863).

Kochanov A.A., Anfinogentov S.A., Prosovetzky 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, S19. 12 p. DOI: [10.1093/pasj/65.sp1.S19](https://doi.org/10.1093/pasj/65.sp1.S19).

Kondo T., Osobe T., Igi S., et al. The Hiraio Radio Spectrograph (HiRAS) for monitoring solar radio bursts. *Journal of the Communications Research Laboratory*. 1995. Vol. 42. P. 111.

Kopp R.A., Pneuman G.W. Magnetic reconnection in the corona and the loop prominence phenomenon. *Solar Phys.* 1976. Vol. 50. P. 85–98. DOI: [10.1007/BF00206193](https://doi.org/10.1007/BF00206193).

Larosa T.N., Moore R.L. A Mechanism for bulk energization in the impulsive phase of solar flares: MHD turbulent cascade. *Astrophys. J.* 1993. Vol. 418. P. 912. DOI: [10.1086/173448](https://doi.org/10.1086/173448).

Lee R., Sudan R.N. Return current induced by a relativistic beam propagating in a magnetized plasma. *Physics of Fluids*. 1971. Vol. 14. P. 1213–1225. DOI: [10.1063/1.1693588](https://doi.org/10.1063/1.1693588).

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).

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. P. 325–340. DOI: [10.1007/BF00645093](https://doi.org/10.1007/BF00645093).

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:1022428818870](https://doi.org/10.1023/A:1022428818870).

Liu S., Li Y., Fletcher L. Impulsive thermal X-ray emission from a low-lying coronal loop. *Astrophys. J.* 2013. Vol. 769, iss. 2, 135. 10 p. DOI: [10.1088/0004-637X/769/2/135](https://doi.org/10.1088/0004-637X/769/2/135).

Manheimer W.M. Energy flux limitation by ion acoustic turbulence in laser fusion schemes. *Physics of Fluids*. 1977. Vol. 20. P. 265–270. DOI: [10.1063/1.861863](https://doi.org/10.1063/1.861863).

McTiernan J.M., Fisher G.H., Li P. The solar flare soft X-ray differential emission measure and the Neupert effect at

different temperatures. *Astrophys. J.* 1999. Vol. 514. P. 472–483. DOI: [10.1086/306924](https://doi.org/10.1086/306924).

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, iss.2. P. 537–549. 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.

Neupert W.M. Comparison of solar X-ray line emission with microwave emission during flares. *Astrophys. J.* 1968. Vol. 153. P. L59.

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).

Rust D.M., Simnett G.M., Smith D.F. Observational evidence for thermal wave fronts in solar flares. *Astrophys. J.* 1985. Vol. 288. P. 401–409. DOI: [10.1086/162804](https://doi.org/10.1086/162804).

Smith D.F., Lillequist C.G. Confinement of hot, hard X-ray producing electrons in solar flares. *Astrophys. J.* 1979. Vol. 232. P. 582–589. DOI: [10.1086/157316](https://doi.org/10.1086/157316).

Somov B.V., Kosugi T., Sakao T. Collisionless three-dimensional reconnection in impulsive solar flares. *Astrophys. J.* 1998. Vol. 497, iss. 2. P. 943–956. DOI: [10.1086/305492](https://doi.org/10.1086/305492).

Sturrock P.A. Model of the high-energy phase of solar flares. *Nature*. 1966. Vol. 211, iss. 5050. P. 695–697. DOI: [10.1038/211695a0](https://doi.org/10.1038/211695a0).

Torii C., Tsukiji Y., Kobayashi S., et al. Full-automatic radiopolarimeters for solar patrol at microwave frequencies. *Proc. of the Research Institute of Atmospheric Physics*. Nagoya University, 1979. Vol. 26. P. 129–132.

Van den Oord G.H.J. The electrodynamics of beam/return current systems in the solar corona. *Astron. Astrophys.* 1990. Vol. 234, no. 1-2. P. 496–518.

Veronig A., Vršnak B., Dennis B.R., et al. Investigation of the Neupert effect in solar flares. I. Statistical properties and the evaporation model. *Astrophys. J.* 2002a. Vol. 392. P. 699–712. DOI: [10.1051/0004-6361:20020947](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20020947).

Veronig A., Vršnak B., Temmer M., Hanslmeier A. Relative timing of solar flares observed at different wavelengths. *Solar Phys.* 2002b. Vol. 208, iss.2. P. 297–315. DOI: [10.1023/A:1020563804164](https://doi.org/10.1023/A:1020563804164).

Veronig A.M., Brown J.C., Dennis B.R., et al. Physics of the Neupert effect: Estimates of the effects of source energy, mass transport, and geometry using RHESSI and GOES data. *Astrophys. J.* 2005. Vol. 621. P. 482–497. DOI: [10.1086/427274](https://doi.org/10.1086/427274).

Vlahos L., Papadopoulos K. Collective plasma effects associated with the continuous injection model of solar flare particle streams. *Astrophys. J.* 1979. Vol. 233. P. 717–726. DOI: [10.1086/157433](https://doi.org/10.1086/157433).

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

URL: <http://ru.iszf.irk.ru/~nata/120629/long.mp4> (дата обращения 26 марта 2024 г.).

URL: <http://ckp-rf.ru/usu/73606/> (дата обращения 26 марта 2024 г.).

URL: <http://ckp-angara.iszf.irk.ru/> (дата обращения 26 марта 2024 г.).

Статья подготовлена по материалам Девятнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 5–9 февраля 2024 г., ИКИ РАН, Москва.

Как цитировать эту статью:

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).