Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2026. С. 114–117.

УДК 523.98
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-114
Orcid 0009-0000-1008-5376

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ГЕНЕРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ В БЕЛОМ СВЕТЕ ВСПЫШКИ 10 МАЯ 2024

И.Д. Мотык[1], Л.К. Кашапова[1], Y. Li[2], D. Song[2], Zh. Jing[2], Xi. Liu[2]

[1]Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, motykilya@iszf.irk.ru
[2]Обсерватория Пурпурной горы Китайской академии наук, Нанкин, Китай

STUDY OF WHITE LIGHT EMISSION GENERATION MECHANISMS IN THE MAY 10, 2024 FLARE

I.D. Motyk[1], L.K. Kashapova[1], Y. Li[2], D. Song[2], Zh. Jing[2], Xi. Liu[2]

[1]Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, motykilya@iszf.irk.ru
[2]Purple Mountain Observatory CAS, Nanjing, China

Аннотация. Представлены результаты проверки гипотезы генерации солнечных вспышек в белом свете высыпаниями слабых потоков ускоренных электронов, не регистрируемых рентгеновскими приборами. На примере вспышки X4.0 от 10 мая 2024 г. (активная область NOAA 13664) проведен совместный анализ данных ASO-S (белый свет, жесткий рентген) и Сибирского радиогелиографа (микроволновые изображения и спектры). Показано, что из четырех микроволновых и рентгеновских всплесков в белом свете наблюдаются только два из-за низкого временного разрешения. Источник жесткого рентгена (50–100 кэВ) присутствует лишь при первом всплеске. Однако спектральный анализ микроволнового излучения выявил гиросинхротронные спектры во время второго всплеска, что однозначно указывает на наличие ускоренных электронов, которые генерируют белый свет, но не детектируются в рентгене. Таким образом, подтверждено, что для исследуемой вспышки механизмом генерации белого света являлось именно высыпание ускоренных электронов.

Ключевые слова: солнечные вспышки, вспышки в белом свете, микроволновый диапазон.

Abstract. In this paper, we present the results of testing the hypothesis that white light solar flares are generated by the precipitation of weak fluxes of accelerated electrons undetectable by X-ray instruments. We carried out a joint analysis of the X4.0 flare of May 10, 2024 (active region NOAA 13664) using data from ASO-S (white light, hard X-rays) and Siberian Radioheliograph (microwave images and spectra). It is shown that only two bursts in white light out of the four in microwave and X-ray range are observed due to low temporal resolution. A hard X-ray source (50–100 keV) is present only during the first burst. However, spectral analysis of the microwave emission revealed gyrosynchrotron spectra during the second burst, which clearly indicates the presence of accelerated electrons that generate white light but are not detected in X-rays. Thus, it is confirmed that the precipitation of accelerated electrons was the mechanism for generating white light for the studied flare.

Keywords: solar flares, white-light flares, microwave range.

ВВЕДЕНИЕ

Белой называется вспышка, где наблюдается усиление интенсивности излучения в бальмеровском и пашеновском континуумах, или в так называемом белом свете, в виде компактных структур (ядер). Считается, что излучение в белом свете, наблюдаемое на диске Солнца, формируется в фотосфере. Такой тип вспышек обычно связан с самыми мощными вспышками X- и M-классов. Наиболее общепринятый механизм генерации вспышечного излучения в данном диапазоне связывают с высыпанием в фотосферу ускоренных электронов с энергиями более 50 кэВ [Aboudarham, Henoux, 1986]. Однако в некоторых вспышках корреляции между жестким рентгеном и белым светом не наблюдалось, а в некоторых вспышках не были зафиксированы потоки электронов энергиями больше 50 кэВ [Sylwester, Sylwester, 2000; Song et al., 2020]. В связи с этим были предложены два возможных объяснения. Первое заключается в том, что в белых вспышках могут работать другие модели выделения энергии или генерации излучения, например фотосферное пересоединение [Chen et al., 2001] или накачка рентгеновским и ультрафиолетовым излучением [Poland et al., 1988]. Второе заключается в том, что рентгеновские инструменты могут быть недостаточно чувствительны к слабому потоку ускоренных электронов [Kashapova et al., 2012]. В данной работе мы сосредоточимся на проверке второй гипотезы на основе наблюдений в микроволновом диапазоне.

Микроволновый диапазон является чувствительным к потокам электронов и предоставляет информацию о слабых потоках ускоренных электронов, в том числе об их свойствах, недоступных для наблюдения в рентгеновском диапазоне. Спектральный анализ микроволнового диапазона позволяет определить механизм излучения (например, тепловой или нетепловой) и параметры окружающей среды (температура и плотность плазмы, напряженность магнитного поля) [Dulk, 1985]. Большинство наблюдений белых вспышек в микроволновом диапазоне проводилось при помощи радиометров и спектрополяриметров, которые получали данные со всего Солнца. Поэтому определение механизма и локализации микроволнового источника представляли собой сложные задачи. Радиоизображения Сибирского радиогелиографа (СРГ) [Алтынцев и др., 2020] позволяют преодолеть эти ограничения и провести спектральный анализ для конкретных источников микроволнового излучения.

Цель данной работы — показать присутствие или отсутствие высыпания ускоренных электронов в белой вспышке 10 мая 2024 г. с использованием пространственно-разрешенных микроволновых наблюдений.

ИНСТУМЕНТЫ И АНАЛИЗ

Космический аппарат Advanced space-based Solar Observatory (ASO-S) [Gan et al., 2023] состоит из нескольких инструментов, позволяющих проводить одновременные наблюдения в диапазоне от белого света до жесткого рентгена. Инструмент White-light Solar Telescope (WST) проводит наблюдения в бальмеровском континууме, благодаря чему достигается высокая контрастность изображений в белом свете. Это позволяет наблюдать в белом свете слабые вспышки и эволюцию ядер. Данные временных профилей и изображений в рентгеновском диапазоне предоставляет Hard X-ray Imager (HXI), работающий в диапазоне 10–300 кэВ. По наблюдениям на инструментах ASO-S был составлен список из 16 подтвержденных белых вспышек для сверхактивной области NOAA 13664 [Jing et al., 2025], из которых семь вспышек наблюдались одновременно СРГ и WST. Из отобранных три вспышки имели класс X и четыре вспышки имели класс M. Для более подробного анализа была выбрана вспышка, которая по времени наблюдалась ближе всего к локальному полудню, а именно вспышка X4.0 10 мая 2024 г. с максимумом в 06:45 UT.

На рис. 1 представлены временные профили вспышки в микроволновом диапазоне (СРГ), мягком и жестком рентгеновском диапазоне (ASO-S/HXI и GOES) и в белом свете в полосе 3600 Å (ASO-S/WST). На микроволновых временных профилях видны четыре всплеска, которые также присутствуют на временном профиле 50–100 кэВ, связанном с ускоренными электронами. При этом в белом свете наблюдаются только два всплеска, которые соответствуют 1-му и 3-му всплескам в микроволновом и рентгеновском диапазонах. Такое несоответствие может быть объяснено тем, что инструмент WST работал в базовом режиме наблюдения с временным разрешением 2 мин, поэтому отклики на 2-й и 4-й всплески незаметны. По этой причине мы сосредоточимся на исследовании откликов только для всплесков, связанных со всплесками в белом свете (здесь и далее всплески).

Для установления механизма генерации данных всплесков в белом свете необходимо локализовать соответствующие им ядра и связанные с ними микроволновые и рентгеновские источники. Поэтому были построены разностные изображения в белом свете (рис. 2), микроволновые и рентгеновские изображения. В связи с разным пространственным разрешением инструментов, видимые ядра в белом свете были сгруппированы в три группы (R1, R2 и R3) таким образом, чтобы расстояние между самыми дальними ядрами группы составляло меньше 25 угл. сек и все ядра группы находились внутри одной диаграммы направленности СРГ на уровне 10 % от максимума на 3.8 ГГц. Группа R1 состоит из двух ядер и расположена вблизи крупного солнечного пятна. Группа R2 состоит из трех ядер и расположена в области с множеством меньших солнечных пятен. R3 состоит из одного ядра и расположена вблизи удаленного солнечного пятна. Таким образом, особенности представленных групп ядер должны определяться магнитными структурами, с которыми они связаны. Рентгеновские изображения, построенные в моменты всплесков в белом свете, показали, что источник жесткого рентгеновского излучения в диапазоне 50–100 кэВ присутствует только для первого, самого мощного всплеска в 06:43:03 UT в группе R1, в то время как для второго всплеска источника в этом диапазоне не наблюдается, однако для него присутствуют источники в мягком рентгене 15–20 и 25–50 кэВ в группе R3.

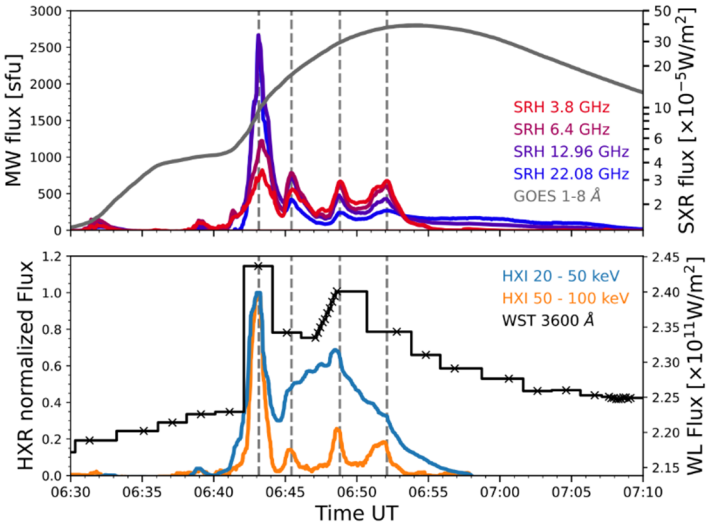

Рис. 1. Временные профили вспышки X4.0 10 мая 2024 г. по данным СРГ (SRH, микроволны), GOES (мягкий рентген), ASO-S/HXI (мягкий и жесткий рентген) и ASO-S/WST (белый свет, полоса 3600 Å). Вертикальными штриховыми линиями обозначены времена максимумов всплесков на частоте 12.96 ГГц. На кривой WST крестиками обозначены моменты, в которые получены снимки всего Солнца в белом свете

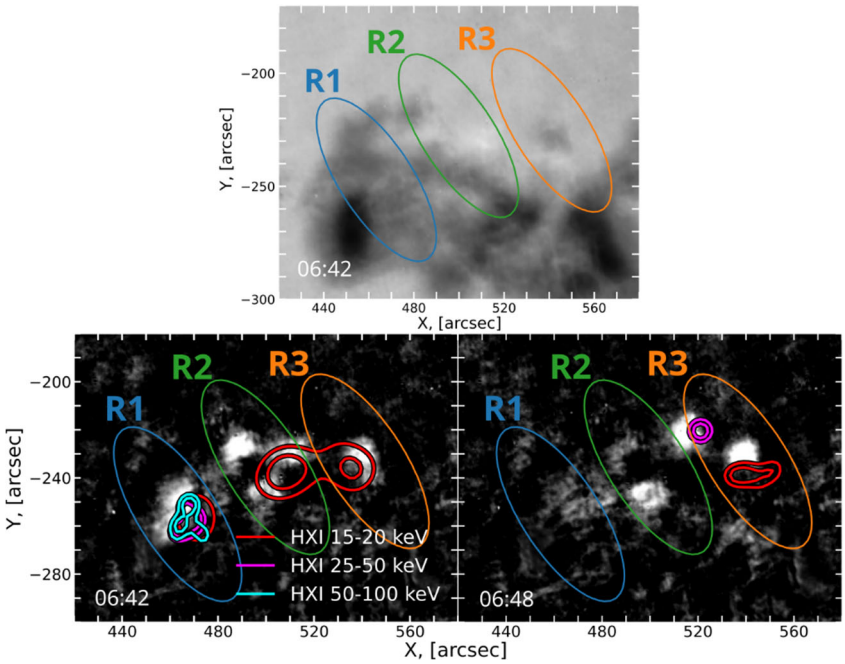

Рис. 2. Активная область (верхняя панель) и разностные изображения (нижние панели) по данным WST. Синим (R1), зеленым (R2) и оранжевым (R3) контурами показаны группы ядер в белом свете и диаграммы направленности СРГ на уровне 10 % от максимума на частоте 3.8 ГГц. Внешний и внутренний контуры рентгеновских источников по данным ASO-S/HXI показывают уровни 50 и 75 % от максимальной интенсивности соответственно

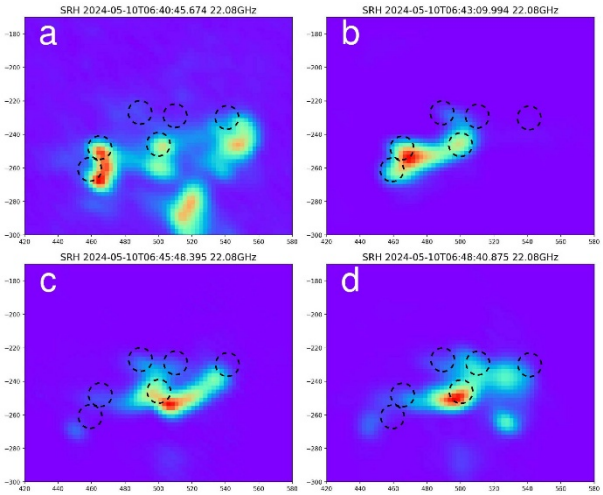

Рис. 3. Изображения, полученные на СРГ на частоте 22.08 ГГц в разные моменты времени эволюции вспышки. Черными штриховыми контурами показано местоположение ядер в белом свете. Все изображения нормированы на максимальное значение интенсивности в кадре

На рис. 3 представлена эволюция вспышки в микроволновом диапазоне на частоте около 22 ГГц. До начала вспышки видна небольшая петля (панель *a*), которая соединяет ядра в области R1 и в результате расширения которой произойдет вспышка. Во время первого всплеска (панель *b*) в 06:43:09 видна петельная структура, соединяющая группы R1 и R2. Затем в 06:45:48, между первым и вторым всплеском, становится видна другая петельная структура, которая соединяет группы R2 и R3 (панель *c*). И во время второго всплеска в 06:48:40 вновь усиливается излучение от петельной структуры, которая соединяла группы R1 и R2.

Далее для трех групп в моменты всплесков были получены спектры, представленные на рис. 4, где коэффициент α показывает наклон низкочастотной области, а δ — наклон высокочастотной области. До момента первого всплеска (левая панель рис. 4) спектр группы R1 показывает присутствие ускоренных электронов, видимых на рис. 3, *a*. Для R2 и R3 наклон в высокочастотной области приближен к тепловому free-free-излучению, а в низкочастотной части для R2 виден сильный наклон в части низких частот (α = 9.52), что свидетельствует о наличии большого количества плазмы, согласно эффекту Разина. Во время первого всплеска (центральная панель рис. 4) в 06:43 UT у спектра группы R1 увеличивается пиковая частота и интенсивность, при этом наклон для низкочастотной части остается примерно таким же. Это свидетельствует об увеличении числа ускоренных электронов и перемещение источника в область более сильного магнитного поля. В то же время для области

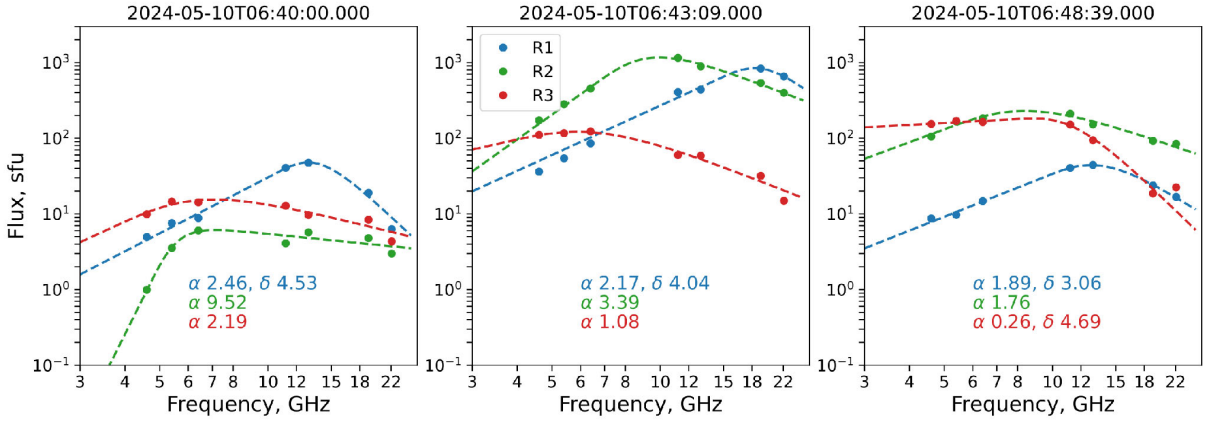

Рис. 4. Спектры групп R1–R3 для момента перед вспышкой (левая панель), для первого (центральная панель) и второго (правая панель) всплесков. Точками показаны данные потока внутри контуров, изображенных на рис. 2. Для случаев δ < 3 коэффициент δ не приводился из-за отсутствия физического смысла

R2 спектр принял форму гиросинхротронного, а интенсивность возросла на три порядка, что говорит о присутствии в этой области большого количества ускоренных электронов. Во время второго всплеска (правая панель рис. 4) в 06:48 UT в R1 ускоренные частицы присутствуют, но в меньшем количестве, при этом форма спектра остается прежней, несмотря на спад интенсивности. Формы спектров R2 и R3 для второго всплеска остаются гиросинхротронными, что указывает на наличие ускоренных электронов, которые сгенерировали излучение в белом свете, но не были обнаружены в рентгеновском диапазоне. Слабый наклон в низкочастотной области спектра R3 может быть объяснен наличием большого количества разогретой плазмы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования была установлена связь ядер в белом свете и рентгеновских источников с микроволновыми источниками. В микроволновом диапазоне были обнаружены признаки присутствия потоков ускоренных электронов, которые не наблюдались в рентгеновском диапазоне. Таким образом был установлен механизм генерации излучения в белом свете, а именно высыпание ускоренных частиц. Для данной вспышки подтверждена гипотеза о присутствии слабых потоков ускоренных электронов, плотность которых ниже порога чувствительности современных рентгеновских приборов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Авторы также благодарят команды СРГ, ASO-S и GOES за предоставление открытого доступа к наблюдательным данным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Aboudarham J., Henoux J.C. Energy deposit at temperature minimum level and white light flares // Astron. and Astrophys. 1986. V. 156, N 1-2. P. 73–78.

Sylwester B., Sylwester J. Evolution of white-light flares observed by YOHKOH // Solar Phys. 2000. V. 194. P. 305–325.

Song Y., Tian H., Zhu X., et al. A white-light flare powered by magnetic reconnection in the lower solar atmosphere // Astrophys. J. Lett. 2020. V. 893, L13.

Chen P.-F., Fang C., Ding M.-D. Ellerman bombs, type II white-light flares and magnetic reconnection in the solar lower atmosphere // Chin. J. Astron. Astrophys. 2001. V. 1, N 2. P. 176.

Poland A.I., Milkey R.W. and Thompson W.T. Hydrogen and helium excitation by EUV radiation for the production of white-light flares // Solar Phys. 1988. V. 115. P. 277–288

Kashapova L.K., Meshalkina N.S., Kisil M.S. Detection of Acceleration Processes During the Initial Phase of the 12 June 2010 Flare // Solar Phys. 2020. V. 280, iss. 2. P. 525–535.

Dulk G.A. Radio emission of the sun and stars // Annual Rev. Astron. Astrophys. 1985. V. 23. P. 169–224.

Алтынцев А.Т., Лесовой С.В., Глоба М.В. и др. Многоволновый Сибирский радиогелиограф // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 2. С. 37–50.

Gan W., Zhu C., Deng Yu., et al. The Advanced Space-Based Solar Observatory (ASO-S) // Solar Phys. 2023. V. 298, 68.

Jing Zh., Li Y., Li Ji., et al. The M- and X-class White-light Flares in Super Active Region NOAA 13664/13697 Observed by ASO-S/LST/WST // Astrophys. J. 2025. V. 992, N 1, 72.