

УДК 523.985.3

ВСПЫШЕЧНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СОБЫТИЯ 04.05.2022 И ЕГО МИЛЛИМЕТРОВАЯ КОМПОНЕНТА

© 2023 г. В. В. Смирнова¹*, Ю. Т. Цап¹, В. С. Рыжов²,
Г. Г. Моторина^{3, 4, 5}, А. С. Моргачев³, М. Барта⁵

¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН, п. г. т. Научный, Россия

²Московский государственный технологический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

³Главная (Пулковская) обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁴Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁵Астрономический институт Чешской Академии Наук, Онджеев, 251 65 Чехия

*e-mail: vvsvid.smirnova@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.03.2023 г.

После доработки 30.03.2023 г.

Принята к публикации 25.05.2023 г.

На основе наблюдений на радиотелескопе РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана на волне 3.2 мм (93 ГГц), а также других (Сибирского радиогелиографа, Solar Dynamics Observatory (SDO), радиообсерватории Metsähovi) наземных и космических инструментах исследовано происхождение миллиметрового излучения солнечной вспышки SOL2022-05-04T08:45 рентгеновского класса M5.7. Анализ временных профилей излучения в рентгеновском и сантиметровом диапазонах показал, что миллиметровый источник излучения едва ли связан с горячей (5×10^5 – 10^7 К) корональной плазмой. Об этом также свидетельствует оценка суб-ТГц потока излучающей горячей плазмы по данным AIA/SDO, который оказался значительно меньше наблюдаемых значений. Получены указания о развитии тепловой неустойчивости во вспышечных ультрафиолетовых петлях. Обосновывается связь миллиметровой компоненты вспышки с тепловым источником в хромосфере Солнца.

DOI: 10.31857/S001679402360028X, EDN: ZVMSYI

1. ВВЕДЕНИЕ

Сравнительно недавно благодаря уникальному инструменту *Atacama Large Millimeter Array* (ALMA, [Wedemeyer et al., 2016]) появилась возможность наблюдать слабые солнечные вспышки с высоким пространственным разрешением в миллиметровом (мм) радиодиапазоне. В частности, в работе Skokić et al. [2023] было изучено 5 событий рентгеновского класса В по классификации GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellites*, [Menzel and Purdom, 1994]), наблюдавшихся на 1.2 и 3 мм с пространственным разрешением ~28 и 60 угл. с соответственно. Карты распределения интенсивности радиоизлучения сравнивались с ультрафиолетовыми и оптическими изображениями, полученными на инструментах *Atmospheric Imaging Assembly* (AIA) и *Helioseismic and Magnetic Imager* (HMI) космической обсерватории *Solar Dynamic Observatory* (SDO, [Lemen et al., 2012]) с временным разрешением 12 и 45 с соответственно. При этом по данным солнечного радиоспектрометра *extended Compact Astronomical Low-cost Low-frequency Instrument for Spectroscopy and Transportable Observatory* (e-CALLIS-

TO) [Benz et al., 2009] и *Radio Solar Telescope Network* (RSTN, [Cliver et al. 1987]) каких-либо всплесков от исследуемых событий в метровом и сантиметровом радиодиапазоне длин волн обнаружить не удалось. Согласно Skokić et al. [2023], источники мм излучения могут соответствовать основаниям или вершинам горячих (10^6 – 10^7 К) корональных петель, после вспышечным петлям и H α -волокам. В некоторых случаях источники мм-излучения вообще не удалось отождествить с какими-либо магнитными структурами.

Несмотря на высокое пространственное разрешение, позволяющее получить изображения источника, ALMA имеет и существенные недостатки. Так, наблюдения вспышек проводились в режиме сканирования всего диска Солнца одиночной антенной (*single-dish mode*) диаметром 12 м. Временное разрешение в используемом режиме наблюдений составило 5 и 10 мин соответственно на 3 и 1.2 мм. Столь низкое разрешение не позволяет однозначно отождествить источник мм-излучения, поскольку он мог быть достаточно динамичным образованием активной области не только во времени, но и пространстве. Вызывает много

вопросов построение временных профилей в миллиметровом диапазоне, так как в исследуемых АО могли происходить локальные усиления яркости. Вероятно, именно поэтому между мм и мягкими рентгеновскими профилями потока излучения временные задержки иногда превышали 30 мин. Из сказанного выше следует, что наблюдения на ALMA не позволяют сделать однозначный вывод об источниках мм излучения, исходя из полученных результатов работы Skokić et al. [2023].

Ранее по ультрафиолетовым данным AIA/SDO и RT-7.5 им. Н.Э. Баумана, технические характеристики которого можно найти в работе [Смирнова и др., 2016], нами было показано, что вклад вспышечной горячей корональной плазмы в миллиметровую компоненту излучения, в частности, на волнах 2.2 и 3.2 мм является несущественный [Trottet et al., 2002; Tsap et al., 2016; Tsap et al., 2018; Morgachev et al., 2018]. Рассчитанные с использованием дифференциальной меры эмиссии потоки мм излучения оказываются заметно меньше наблюдаемых значений. Откуда следует необходимость проведения дальнейших детальных исследований, связанных с отождествлением источников миллиметрового излучения солнечных вспышек в области энерговыделения.

В настоящей работе, по данным радиотелескопа RT-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана на длине волны 3.2 мм (93 ГГц), а также других наземных и космических инструментов проводится исследование происхождения мм излучения солнечной вспышки SOL2022-05-04T08:45. Отличительная особенность этого события состояла в том, что, у него отсутствовала ярко выраженная мм импульсная фаза, что в свете стандартной модели солнечной вспышки требует более детального анализа.

Цель данной работы — выяснить природу миллиметрового излучения вспышки и уточнить связь миллиметрового источника с горячей корональной плазмой.

2. ОБРАБОТКА НАБЛЮДЕНИЙ

Вспышка SOL2022-05-04T08:45 рентгеновского класса M5.7 произошла в активной области NOAA 13004 (S15, W16). По данным GOES она началась в 08:45:00 UT и достигла максимума в 08:59:00 UT. Это событие одновременно наблюдалось в крайнем ультрафиолетовом и жестком рентгеновском диапазонах соответственно на AIA/SDO и KA Konus-Wind [Lysenko et al., 2022], а также на микроволнах с помощью Сибирского радиогелиографа (СРГ, [Алтынцев и др., 2020]), RSTN и радиообсерватории Metsähovi [Urho, 1982]. Миллиметровые наблюдения проводились на радиотелескопе RT-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана на

частоте 93 ГГц (3.2 мм). В отличие от редких наблюдений Солнца на ALMA, наблюдения на радиотелескопе RT-7.5 МГТУ, несмотря на сравнительно невысокое пространственное разрешение (2.5 и 1.5 угл. мин на волнах 3.2 и 2.2 мм), имеют ряд преимуществ. В частности, наблюдения вспышек на модернизированном радиотелескопе RT-7.5, на волнах 2.2 и 3.2 мм, в большинстве случаев, проводятся методом непрерывного ведения активной области с временным разрешением 0.25 с.

На рис. 1 представлена магнитограмма (слева) и карта распределения интенсивности излучения в линии 304 Å активной области 13004 (справа) на фазе спада вспышки. Вспышечное излучение наблюдалось в области между ведущим и хвостовыми пятнами отрицательной (белая сплошная линия) и положительной (белая пунктирная линия) полярности соответственно.

Исходя из интенсивности нескольких ультрафиолетовых линий, была оценена площадь активной области вспышки около ее максимума 09:05:00 UT. При этом для одного и того же момента времени выбирались только не засвеченные изображения. Полученные таким образом значения площади представлены в табл. 1.

Площадь измерялась методом, предложенным в работе Kontar et al. [2018] для вспышечных лент в линии 1600 Å. В табл. 1 представлены два набора значений площадей: по контуру 70% и 50% от максимальной интенсивности. В колонке 4 табл. 1 приведены значения логарифмов максимальных температур, полученных в работе [Lemen et al., 2012], откуда видно, что температурный отклик может быть достаточно сложным, а для некоторых ультрафиолетовых линий он имеет два-три максимума. Отметим также, что излучение в линии 304 Å зачастую оказывается оптически толстым, поэтому изучение дифференциальной меры эмиссии

$$\phi(T) = n_e^2 \frac{dl}{dT},$$

где n_e — концентрация электронов, l — геометрическая толщина вдоль луча зрения, T — температура, в данной линии может приводить к заметным погрешностям.

Для большей наглядности, на рис. 2 представлена зависимость площади источника крайнего ультрафиолетового излучения вспышки от длины волны λ . Видно, что площадь источника вспышки непрерывно увеличивается с ростом λ .

Временные профили вспышки, полученные в рентгеновском, мм и сантиметровом диапазонах длин волн, представлены на рис. 3. Отметим, что степень круговой поляризации мм излучения в максимуме составила ~3%. Наблюдения на волне 3.2 мм проводились методом непрерывного ведения активной области. На рис. 3а видно, что вре-

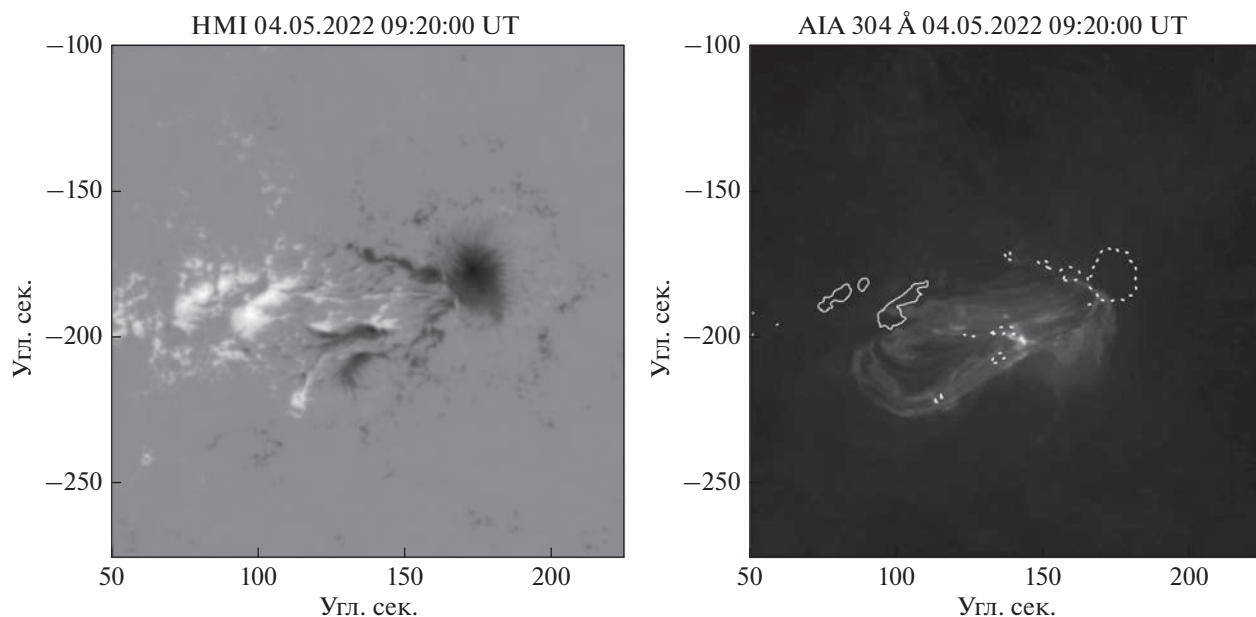


Рис. 1. Слева: магнитограмма активной области 13004 по данным HMI/SDO, в которой произошла вспышка. Справа: изображение той же области в линии 304 Å. Белыми контурами показаны области положительной (сплошная линия) и отрицательной (пунктирная линия) магнитной полярности, соответствующие уровню 50% от максимальной напряженности согласно магнитограммам HMI/SDO. Гелиографические координаты указаны в угловых секундах (угл. с).

менной профиль вспышки на 93 ГГц заметно отличается от профилей, полученных в микроволновом и рентгеновском диапазонах. Интересно отметить, что импульсы в микроволновом диапазоне становятся менее ярко выраженными с увеличением частоты, а на 93 ГГц они сглаживаются рис. 3б. Причем профиль мм излучения в максимуме вспышки сдвинут и совпадает с тепловой (постимпульсной) фазой вспышки, наблюдаемой в микроволновом диапазоне.

Спектры плотности потока радиоизлучения в разные моменты времени представлены на рис. 4. Для их построения мы дополнительно привлекли наблюдения потока излучения на волне 8 мм (37 ГГц)

по данным радиотелескопа РТ-14 (Metsähovi), которые были получены методом картографирования полного солнечного диска.

В качестве первого момента 08:56:33 UT был выбран максимум импульсной фазы вспышки в микроволновом диапазоне (рис. 4, слева). Поток излучения достигает максимума на частоте 11.2 ГГц, после чего уменьшается вплоть до 93 ГГц. Спектральный индекс между частотами 37 и 93 ГГц равен

$$\alpha = \frac{\ln(\text{flux}_{93} / \text{flux}_{37})}{\ln(f_{93} / f_{37})} \approx -1.2,$$

где flux — плотность потока радиоизлучения на частоте f .

Таблица 1.

Длина волны (Å)	70% I (см ²)	50% I (см ²)	log(T)
94	1.4×10^{17}	5.8×10^{17}	6.8
131	1.6×10^{17}	4.6×10^{17}	5.6, 7.0, 7.2
171	5.2×10^{17}	6.9×10^{17}	5.8
193	6.1×10^{17}	1.6×10^{18}	6.1, 7.3
211	1.7×10^{18}	3.0×10^{18}	6.3
304	3.8×10^{18}	4.2×10^{18}	4.7, 6.1
335	4.3×10^{18}	4.1×10^{18}	5.2, 6.4

Примечание: В первом столбце представлены спектральные полосы линий крайнего ультрафиолета по наблюдениям AIA/SDO (Å). Во втором и третьем столбцах — площади источника вспышки по контурам 70 и 50% от максимальной интенсивности (I), соответственно. В четвертом столбце — логарифм максимальной температуры формирования линий.

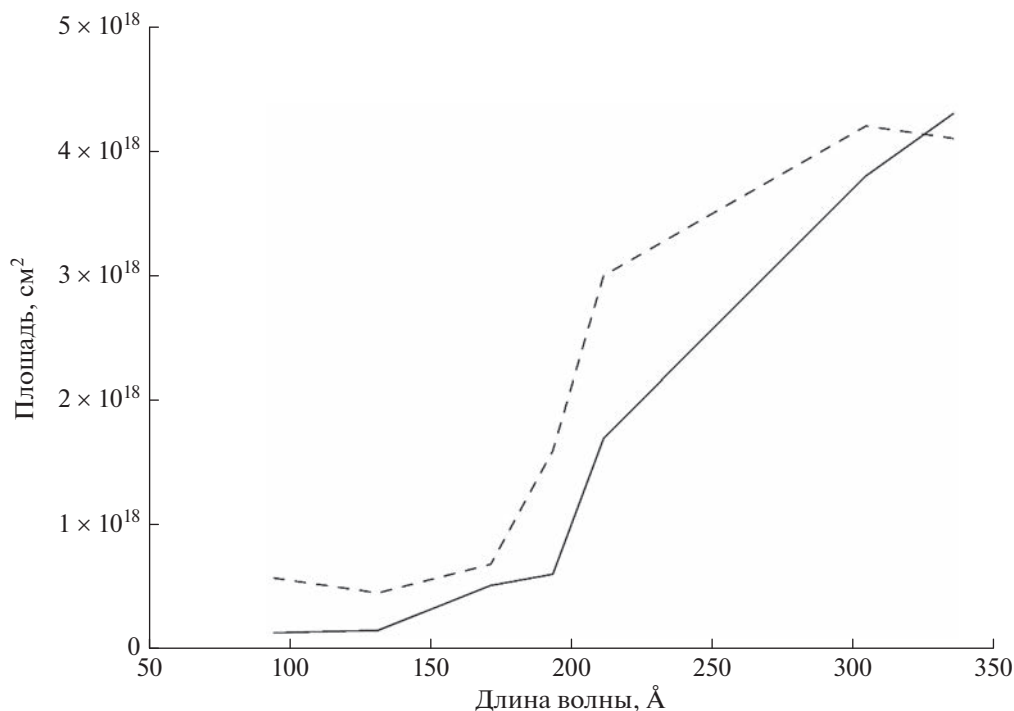


Рис. 2. Зависимость площади источника вспышки от длины волны по данным AIA/SDO (из табл. 1). Сплошная и пунктирная линии соответствуют контурам 70 и 50% от максимальной интенсивности, измеренной в каждой линии.

Второй момент времени 09:05:38 UT соответствует тепловой фазе вспышки. Хорошо заметно, что спектр на высоких частотах становится плоским.

В качестве дополнения к анализу временных профилей вспышки мы провели сравнение профилей интенсивности излучения линий крайнего ультрафиолета и мм излучения (рис. 5). Легко видеть, что профили ведут себя различным образом, что свидетельствует о сильной неоднородности области вспышечного энерговыделения.

По данным AIA/SDO мы также проанализировали двумерные распределения меры эмиссии и температуры для нескольких моментов времени на фазе роста и вблизи импульсной фазы вспышки. Карты этих распределений представлены на рис. 6. На фазе роста излучения вспышки (панели *a*, *b*) заметно повышение температуры источника, тогда как вблизи максимума мм излучения (панель *в*) температура падает, а мера эмиссии растет. На наш взгляд, это может свидетельствовать о развитии тепловой неустойчивости [Field, 1965], в основе развития которой лежит рост радиационных потерь с уменьшением температуры тепловой плазмы.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Для того чтобы оценить вклад горячей корональной плазмы в поток мм излучения вспышки,

с помощью метода, описанного в работе [Hannah and Kontar, 2012], нами был произведен расчет дифференциальной меры эмиссии $\phi(T)$ (рис. 7а). Это позволило оценить поток излучения корональной плазмы $flux_{93}$, используя известные формулы и стандартные обозначения для определения яркостной температуры $T_b(\nu)$ и оптической толщины τ_ν источника вспышки (см., например, [Dulk, 1985; Tsap et al., 2016]):

$$T_b(\nu) = \frac{1}{\nu^2} \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} \frac{K\phi(T)}{\sqrt{T}} e^{-\tau_\nu(T)} dT,$$

$$\tau_\nu = \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} \frac{K\phi(T)}{T^{3/2}\nu^2} dT,$$

где численный коэффициент $K = 9.78 \times 10^{-3} \times (24.5 - \ln(T) - \ln(\nu))$ для $T > 2 \times 10^5$ К.

Результат расчета потока горячей корональной плазмы показан на графике, на рис. 7б.

Из графика на рис. 7б видно, что поток радиоизлучения корональной плазмы не превышает 27 с.е.п. на частотах >15 ГГц. Это свидетельствует о незначительном вкладе горячей корональной плазмы в мм-излучение вспышки и малой оптической толщине источника на частотах >15 ГГц.

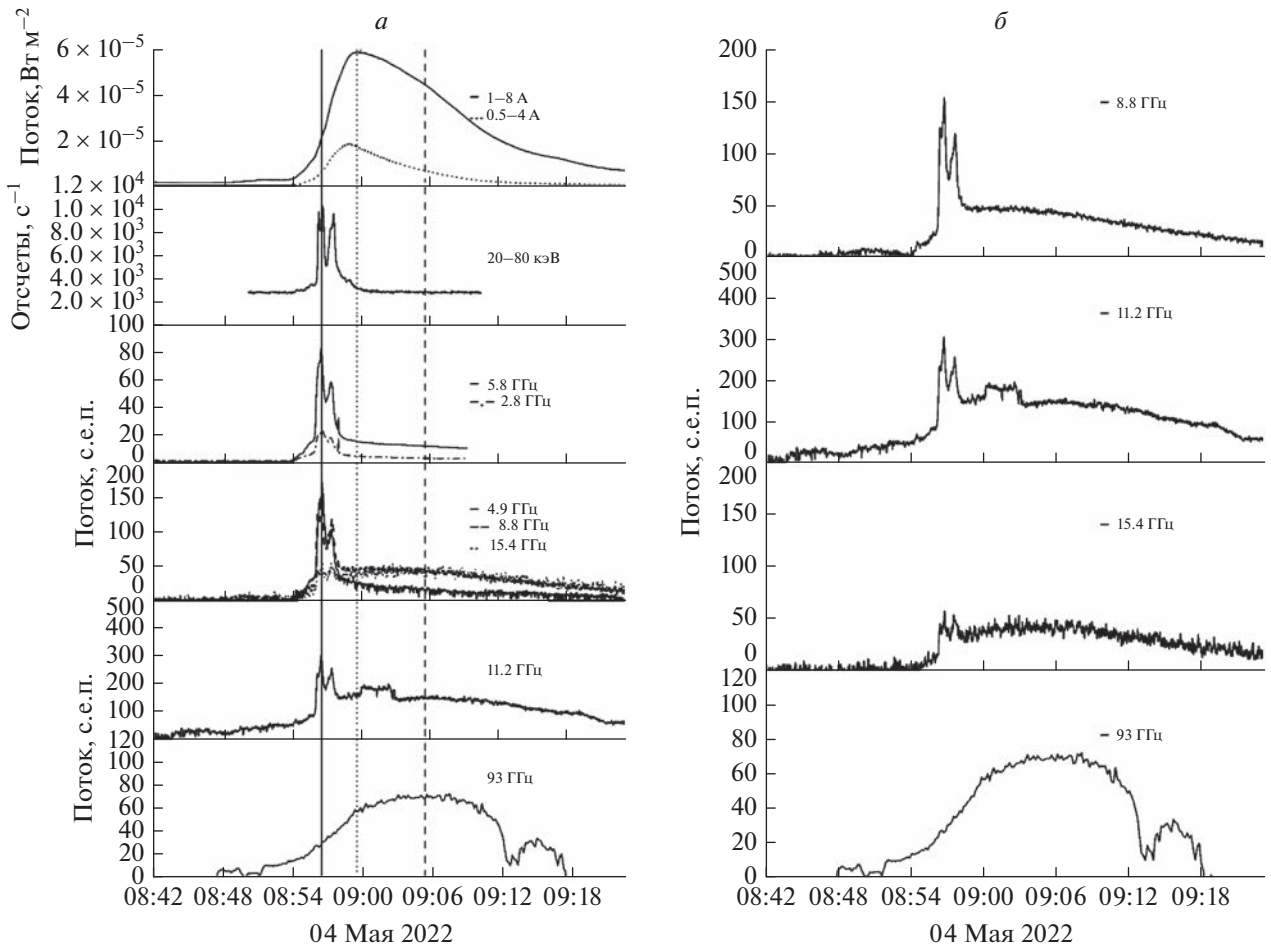


Рис. 3. (а) – Временные профили вспышки SOL2022-05-04T08:45. Сверху-вниз: 1–8 и 0.5–4 Å (GOES); 20–80 кэВ (Konus-Wind); 2.8 и 5.8 ГГц (СРГ); 4.9, 8.8, 15.4 ГГц (RSTN, San-Vito), 11.2 ГГц (Metsähovi); 93 ГГц (PT-7.5). Поток радиоизлучения указан в солнечных единицах потока (с.е.п.). (б). То же, что и (а), но только для 8.8, 11.2, 15.4 и 93 ГГц.

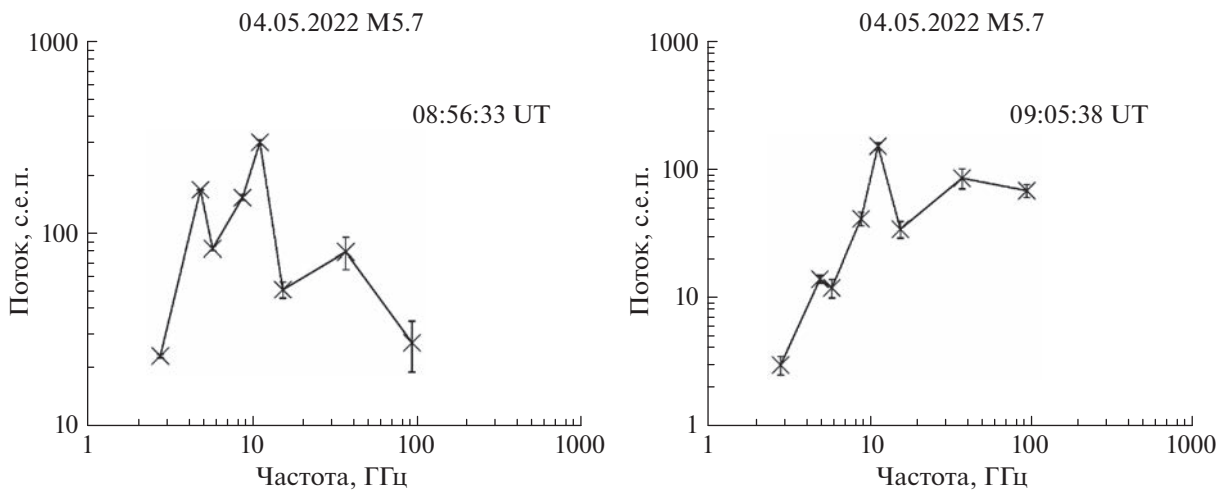


Рис. 4. Спектры плотности потока радиоизлучения, полученные в 08:56:33 UT (слева) и 09:05:38 UT (справа), что соответствует микроволновому и мм-максимуму вспышки.

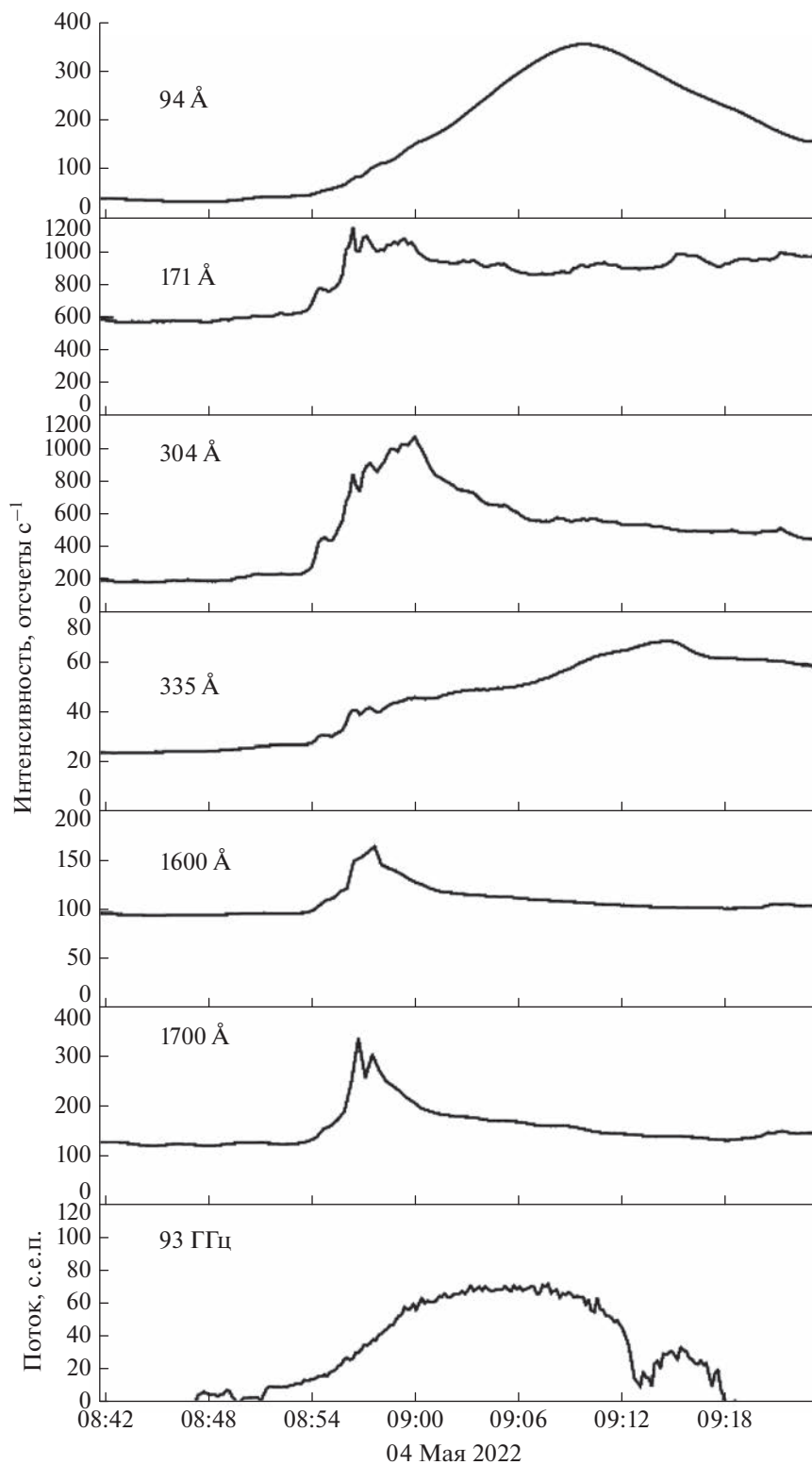


Рис. 5. Временные профили интенсивности излучения в линиях крайнего ультрафиолета по данным AIA/SDO и потока радиоизлучения на волне 3.2 мм.

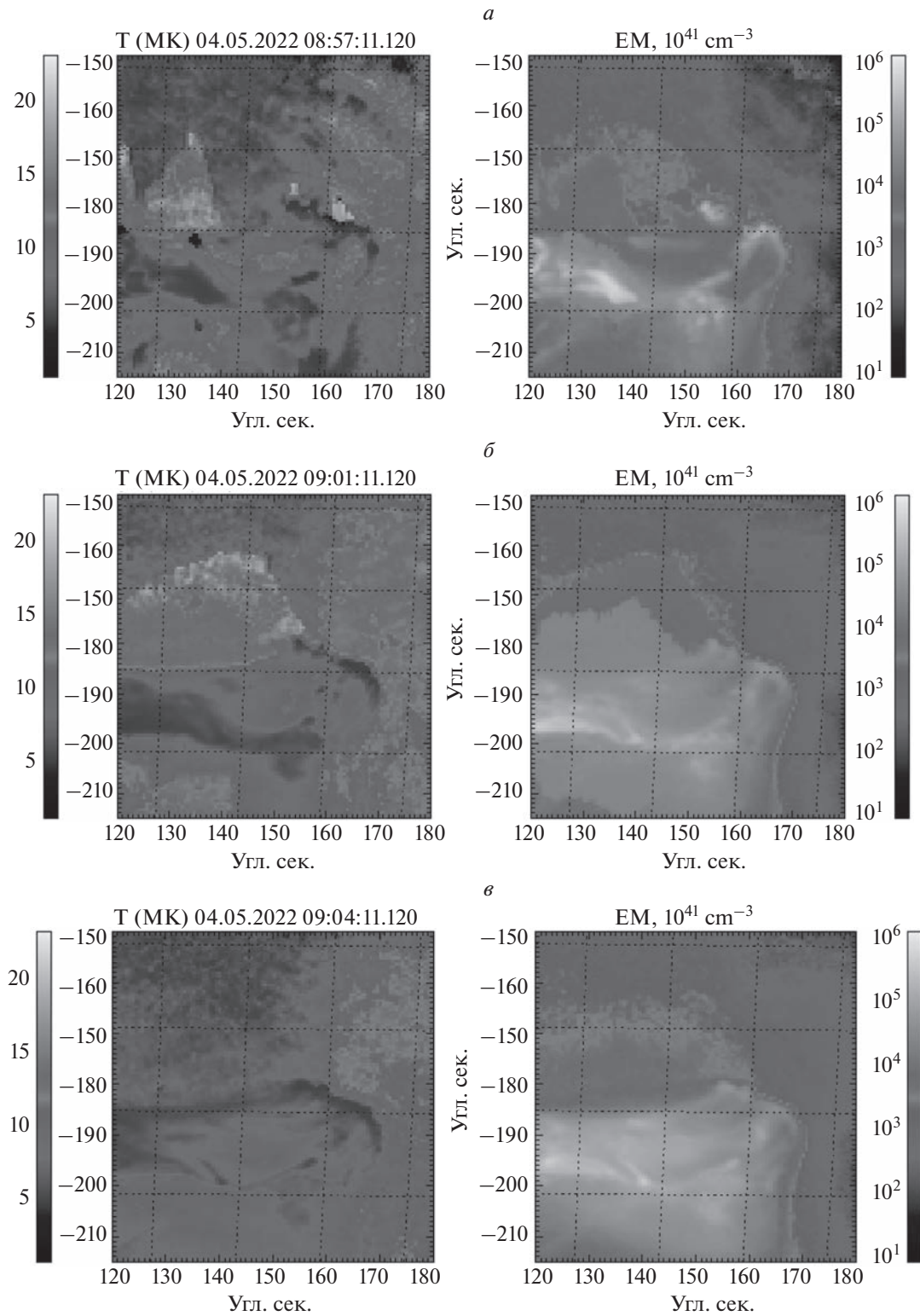


Рис. 6. Карты распределения температуры (Т) и меры эмиссии (ЕМ) для фазы роста вспышечного излучения (а, б) и для фазы вблизи максимума мм-излучения (в).

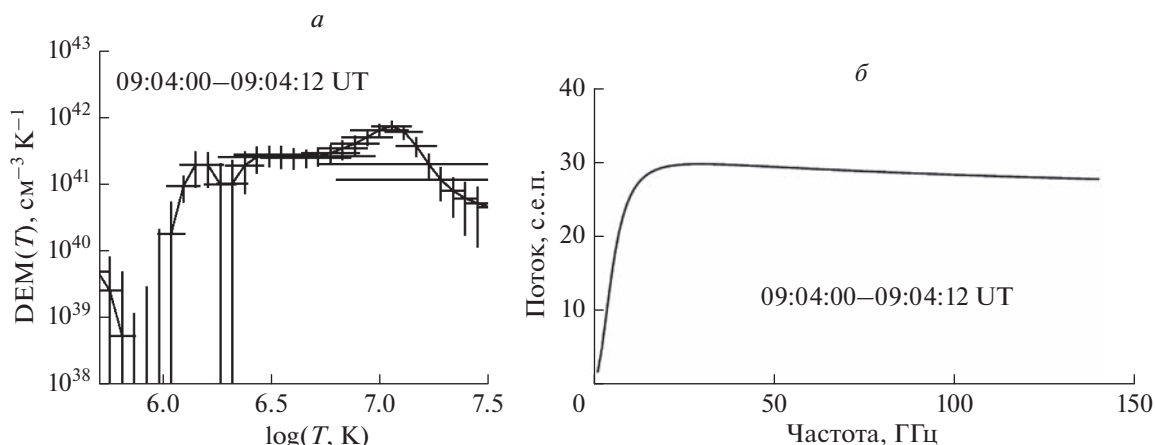


Рис. 7. Панель (а): Дифференциальная мера эмиссии излучающей плазмы (DEM) по данным AIA/SDO, с температурой $T = 0.5\text{--}32$ МК. Панель (б): расчетный поток радиоизлучения корональной плазмы в интервале времени вблизи максимума мм-излучения вспышки.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В данной работе нами был проведен анализ мм радиоизлучения вспышки SOL2022-05-04T08:45 рентгеновского класса M5.7, которое отличалось отсутствием импульсной фазы, что встречается далеко не всегда в суб-ТГц событиях [Smirnova et al., 2021]. Благодаря использованию наблюдений в рентгеновском, ультрафиолетовом, и микроволновом диапазонах, было установлено, что поведение временных профилей мм излучения существенно отличается от поведения профилей в других диапазонах. Максимум временного профиля потока мм излучения оказался сдвинут по времени относительно импульсной фазы вспышки и показал хорошее совпадение с ее тепловой фазой.

Результаты расчета потока мм излучения по данным о дифференциальной мере эмиссии показывают, что горячие корональные петли дают незначительный вклад в мм-вспышечное излучение. На первый взгляд может показаться, что этот вывод является несколько спекулятивным, поскольку поток мм излучения на 93 ГГц приблизительно лишь в два раза меньше наблюдаемых значений. Однако здесь необходимо учесть, что при проведении расчетов мы использовали максимальную площадь, соответствующую линии 335 А, приняв во внимание возможный определяющий вклад в излучение более холодной плазмы, что хорошо согласуется с результатами расчетов, полученных в работе [Kontar et al., 2018]. Следовательно, рассчитанную нами величину спектрального потока мм излучения можно рассматривать как оценку “сверху”, а значит, вклад горячей корональной плазмы едва ли может быть значительным.

Полученные результаты свидетельствуют, что за генерацию мм излучения вспышки SOL2022-

05-04T08:45 скорее была ответственна тепловая хромосферная плазма. При этом, судя по поведению временных профилей, нагрев хромосферы едва ли связан с ускоренными частицами. В рассматриваемом событии энерговыделение происходило не только в короне, но и нижележащих слоях атмосферы Солнца, что и было нами обнаружено благодаря мм наблюдениям.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ No. 20-52-26006 (В.В. Смирнова), РФФ No. 22-12-00308 (Ю.Т. Цап, А.С. Моргачев), the State Assignment No. 0040-2019-0025 (Г.Г. Моторина), RVO:67985815, the project LM2018106 of the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic, Grant 21-16508J of the Grant Agency of the Czech Republic (М. Бапра, Г.Г. Моторина).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алтынцев А.Т., Лесовой С.В., Глоба М.В. и др. Многоволновый сибирский радиогелиограф // Солнечно-земная физика. Т. 6. № 2. С. 37. 2020.
- Смирнова В.В., Цап Ю.Т., Шумов А.В. и др. Анализ механизмов генерации излучения рентгеновского, микроволнового и миллиметрового диапазонов в плазме солнечной вспышки 5 июля 2012 г. // Наука и образование: науч. изд-е МГТУ им. Н. Э. Баумана. № 12. С. 85–97. 2016.
- Benz A.O., Monstein C., Meyer H., Manoharan P.K., Ramesh R., Altyntsev A., Lara A., Paez J., Cho K.-S. A World-

- Wide Net of Solar Radio Spectrometers: e-CALLISTO // Earth, Moon, and Planets. V. 104. P. 277–285. 2009.
- *Dulk G.A.* Radio emission from the sun and stars // Annual Rev. Astron. Astrophys. V. 23. P. 169–224. 1985.
- *Field G.B.* Thermal instability // ApJ. V. 142. P. 531–567. 1965.
- *Cliver E.W., Gentile L.C., Wells G.D.* RSTN (Radio Solar Telescope Network) observations of the 16 February 1984 cosmic-ray flare // United States: N. p. 1987.
- *Hannah I.G., Kontar E.P.* Differential emission measures from the regularized inversion of Hi-node and SDO data // A&A. V. 539. Id. A146. P. 14. 2012.
- *Kontar E.P., Motorina G.G., Jeffrey N.L.S. et al.* Frequency rising sub-THz emission from solar flare ribbons // Astron. Astrophys. V. 620. Id. A95. P. 6. 2018.
- *Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J.* The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // Sol. Phys. V. 275. I. 1–2. P. 17–40. 2012.
- *Lysenko A.L., Ulanov M.V., Kuznetsov A.A., Fleishman G.D., Frederiks D.D., Kashapova L.K., Sokolova Z.Ya., Svinkin D.S., Tsvetkova A.E.* KW-Sun: The Konus-Wind Solar Flare Database in Hard X-ray and Soft Gamma-ray Ranges // Ap. J. Suppl. Series. V. 262. P. 32–39. 2022.
- *Menzel W.P., Purdom J.F.W.* Introducing GOES-I: The first of a Generation of new Geostationary Operational Environmental Satellites // Bulletin of the American Meteorological Society. V. 75. № 5. P. 757–781. 1994.
- *Morgachev A.S., Tsap Yu. T., Smirnova V.V., Motorina G.G.* Simulation of Subterahertz Emission from the April 2, 2017 Solar Flare Based on the Multiwavelength Observations // Ge&Ae. V. 58. I. 8. P. 1113–1122. 2018.
- *Skokić I., Benz A.O., Brajša R. et al.* Flares detected in ALMA single-dish images of the Sun // As-tron. Astrophys. V. 669. Id. A156. P. 11. 2023.
- *Smirnova V.V., Tsap Yu. T., Morgachev A.S., Motorina G.G., Bárta M.* The Origin of Time Delays between Sub-Terahertz and Soft X-ray Emission from Solar Flares // Ge&Ae. V. 61. Iss. 7. P. 993–1000. 2021.
- *Trottet G., Raulin J.-P., Kaufmann P. et al.* First detection of the impulsive and extended phases of a solar radio burst above 200 GHz // Astron. Astrophys. V. 381. P. 694–702. 2002.
- *Tsap Yu. T., Smirnova V.V., Morgachev A.S. et al.* On the origin of 140 GHz emission from the 4 July 2012 solar flare // Adv. Space. Res. V. 57. I. 7. P. 1449–1455. 2016.
- *Tsap Yu. T., Smirnova V.V., Morgachev A.S. et al.* Millimeter and X-Ray Emission from the 5 July 2012 Solar Flare // Sol. Phys. V. 293. I. 3. Id. 50. 2018.
- *Urpo S.* Observing methods for the millimeter wave radio telescope at the Metsähovi Radio Research Station and observations of the Sun and extragalactic sources // PhD thesis. Helsinki University of Technology, Espoo, Finland. 1982.
- *Wedemeyer S., Bastian T., Brajša R. et al.* Solar Science with the Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array—A New View of Our Sun // Space Sci. Rev. V. 200. I. 1–4. P. 1–73. 2016.