

УДК 520.27; 533.9.082.74; 52-77

Моделирование суб-миллиметровой части спектра радиоизлучения солнечных вспышек

Шустиков В. Ю.¹, Шумов А. В.^{1,*},

[*shum_ov@mail.ru](mailto:shum_ov@mail.ru)

Цап Ю. Т.², Жаркова Н. А.¹,

Моргачев А. С.³, Моторина Г. Г.⁴,

Контарь Э. П.⁵, Нагнибеда В. Г.⁶,

Рыжов В. С.¹, Смирнова В. В.⁴,

Стрекалова П. В.⁶

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

²Крымская Астрофизическая Обсерватория, п. Научный, Россия

³Научно-исследовательский Радиофизический Институт,
Нижний Новгород, Россия

⁴Главная (Пулковская) Астрономическая Обсерватория (РАН),
Санкт-Петербург, Россия

⁵Университет Глазго, Глазго, Шотландия

⁶Санкт-Петербургский Государственный Университет,
Санкт-Петербург, Россия

Было подробно проанализировано вспышечное событие, произошедшее 04.07.2012 г. по данным радионаблюдений на телескопе РТ-7,5 МГТУ им. Н.Э. Баумана на частотах 93 (3,2 мм) и 140 (2,2 мм) ГГц, а также, по данным сети солнечных радиотелескопов RSTN, рентгеновских спутников GOES, RHESSI, и космической обсерватории SDO. Наблюдаемый спектр плотности потока радиоизлучения показал рост потока суб-миллиметрового излучения с частотой ($F_{140} > F_{93}$, где F – плотность потока излучения), что не соответствовало типичным наблюдениям и стандартным теоретическим моделям вспышечного процесса в радиодиапазоне. Был получен модельный спектр плотности потока радиоизлучения для данного события. Было показано, что корональная плазма с температурой выше 0,5 МК не может быть ответственна за суб-миллиметровую часть спектра из-за малых значений потока. Дана оценка, что нетепловой гиротронный механизм излучения может быть ответственен за микроволновую часть спектра, тогда как суб-миллиметровая часть может генерироваться плазмой с температурой порядка 0,1 МК.

Ключевые слова: радиоизлучение, суб-миллиметровый диапазон волн, солнечная вспышка, радиотелескоп, спектр, плазма

Введение

Несмотря на значительный прогресс в наблюдениях солнечных вспышек при помощи новых наземных и космических инструментов, механизм вспышечного энерговыделения до сих пор однозначно не определен. Важную роль здесь играют наблюдения в мало изученных спектральных диапазонах, особенно в суб-миллиметровом радиодиапазоне ((100-1000) ГГц ($\sim(3-0,3)$ мм)), где имеется недостаток наблюдательных данных. Наблюдения в данном диапазоне могут дать необходимую информацию об ускорении высокоэнергичных частиц с энергиями порядка 1 МэВ [4, 11, 14, 17, 18, 28]. Наблюдения на фиксированных частотах 200 и 400 ГГц стали возможными только в последние два десятилетия с помощью Солнечного Субмиллиметрового Радиотелескопа [9] и Кельнской обсерватории субмиллиметровой и миллиметровой астрономии [17]. Первые независимые исследования поведения спектра плотности потока радиоизлучения вспышек на этих частотах показали уменьшение потока излучения с частотой, что было интерпретировано как продолжение гиротронного спектра [10, 11, 17, 26]. Однако, в последующих наблюдениях было выявлено необычное поведение спектра, характеризовавшееся положительным наклоном, когда наблюдался рост потока излучения с частотой как для импульсной фазы вспышки, так и для фазы спада [10, 11, 17, 19, 23, 26]. Важно отметить, что значительный пробел в наблюдательном спектре плотности потока коротковолнового радиоизлучения, между микроволновым (сантиметровым) и суб-миллиметровым диапазонами затрудняют интерпретацию необычного поведения спектра солнечных вспышек. Более того, современные модели вспышечного радиоизлучения предполагают, что на частотах ниже 200 ГГц рост спектра с частотой может наблюдаться чаще, чем на более высоких частотах.

В настоящее время активно проводятся наблюдения солнечных вспышек на радиотелескопе РТ-7,5 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Этот телескоп работает в мало изученном диапазоне спектра, на длинах волн 3,2 и 2,2 мм (93 и 140 ГГц), что дает уникальную информацию о параметрах плазмы хромосферы и зоны температурного минимума. С помощью наблюдений на различных инструментах было получено относительно небольшое количество данных о вспышечном радиоизлучении на частотах, близких к 93 ГГц, а на частоте 140 ГГц такие наблюдения не проводились. По этим причинам полученные на радиотелескопе РТ-7,5 данные имеют высокую ценность [1].

Данная работа посвящена моделированию и интерпретации причины роста спектра плотности потока суб-миллиметрового радиоизлучения с частотой на примере вспышки GOES класса M 5.3, произошедшей 04.07.2012 в активной области 11515. Данная вспышка наблюдалась на радиотелескопе РТ-7,5 МГТУ им. Н.Э. Баумана и была описана в работах [1] и [24], где было сделано предположение, что причиной усиления потока

радиоизлучения с частотой является тормозное излучение тепловых электронов в горячей плазме солнечной хромосферы. Были получены приблизительные оценки температуры плазмы в источнике вспышки.

В данной работе предложены модельные расчеты спектра плотности потока суб-миллиметрового радиоизлучения на основе гиротронного кода Флейшмана-Кузнецова [5]. В разделе 1 кратко описаны наблюдательные данные, инструменты и методы обработки, использованные в работе. Раздел 2 посвящен результатам моделирования радиоизлучения вспышки. В разделе 3 представлены обсуждение результатов и выводы.

1. Инструменты и обработка данных

Поток суб-миллиметрового радиоизлучения вспышки 04.07.2012, максимум которой наблюдался в 09:55 UT, был получен на частотах 93 и 140 ГГц (3,2 и 2,2 мм) на радиотелескопе РТ-7,5 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Это антенна кассегреновского типа, диаметром 7,75 м. Диаграмма направленности антенны составляет 2,5 и 1,5 угл. мин. на указанных длинах волн 3,2 и 2,2 мм соответственно [22]. Чувствительность приемной аппаратуры составляет 0,3 К при времени интегрирования данных 1 с.

Дополнительно, были использованы данные о плотности потока сантиметрового радиоизлучения, полученные на радиотелескопе РТ-1,8 обсерватории Метсахови, на частоте 11,7 ГГц (~2 см) [29]. Также, были использованы микроволновые данные радиоастрономической сети RSTN на частотах 5, 8,8, и 15,4 ГГц (6 см, 3,5 см, 1,9 см).

Ультрафиолетовая и рентгеновская диагностика вспышки была получена с помощью данных обсерваторий SDO [15], RHESSI [16] и GOES [31]. Данные инструменты чувствительны к солнечной плазме в широком диапазоне температур, от 0,5 до 40 МК.

Временные профили излучения вспышки представлены на рис. 1.

Из рис. 1 (панель d) видно, что значение потока радиоизлучения на частоте 140 ГГц превышает значение потока на частоте 93 ГГц. Максимум вспышки в суб-миллиметровом диапазоне совпадает с максимумом потока рентгеновского излучения в каналах (1-8) А и (0,5-4) А (панель а). Максимум излучения в микроволновом диапазоне на частотах 6, 8,8 и 11,7 ГГц сдвинут относительно суб-миллиметрового излучения на (10-15) секунд (панель с), а второй максимум жесткого рентгеновского излучения в каналах (25-50), (50-100) и (100-300) кэВ (панель б) хорошо совпадает с микроволновым излучением вспышки. Важно отметить, что жесткое рентгеновское излучение с энергией фотонов больше 50 кэВ было очень слабым, наблюдался только один максимум, в отличие от временного профиля в канале (25-50) кэВ.

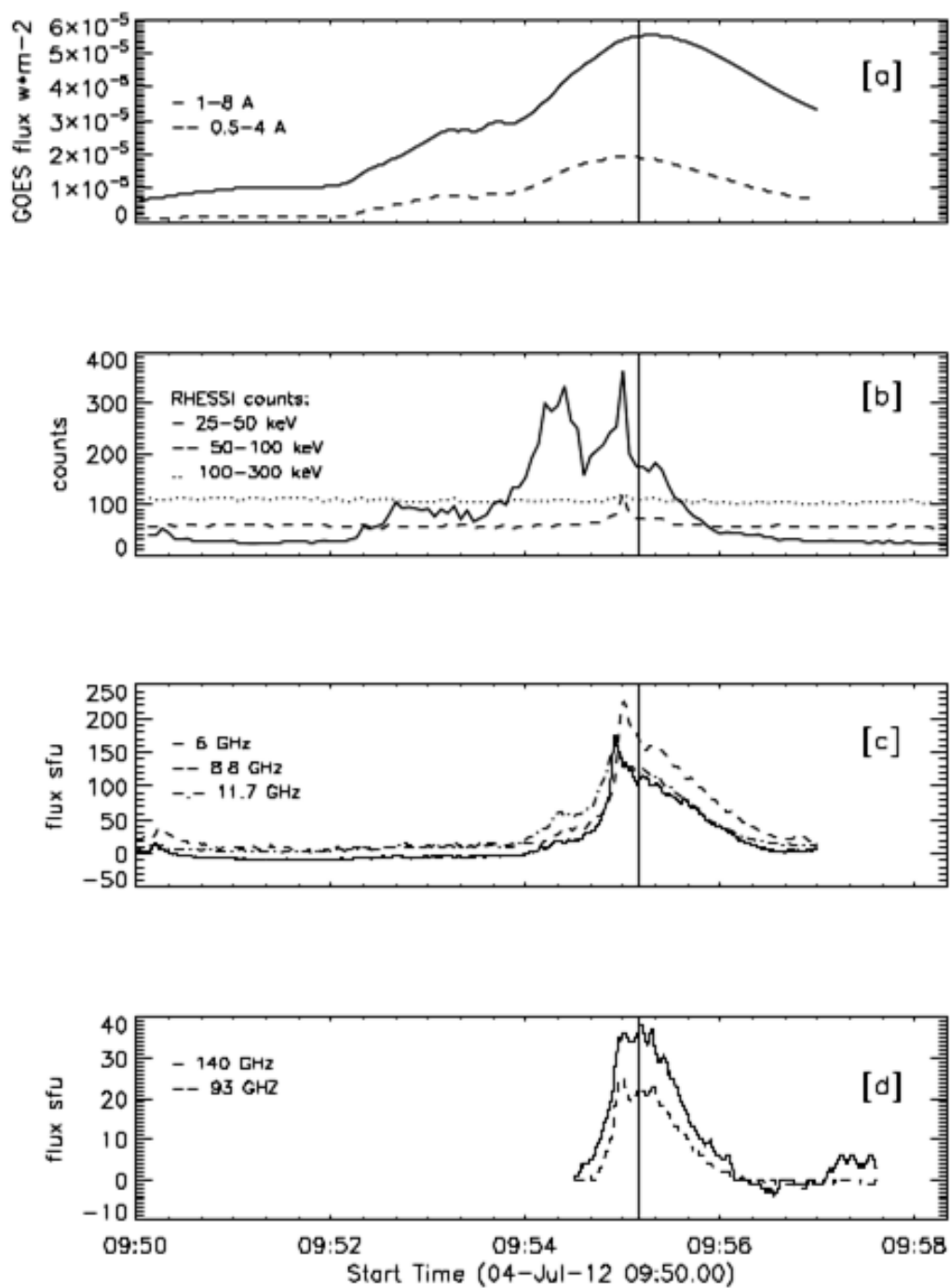


Рис. 1. Временные профили излучения вспышки

На рис. 2 (левая панель) представлен микроволновый спектр радиоизлучения вспышки с максимумом на частоте 8,8 ГГц и положительным наклоном в суб-миллиметровой части.

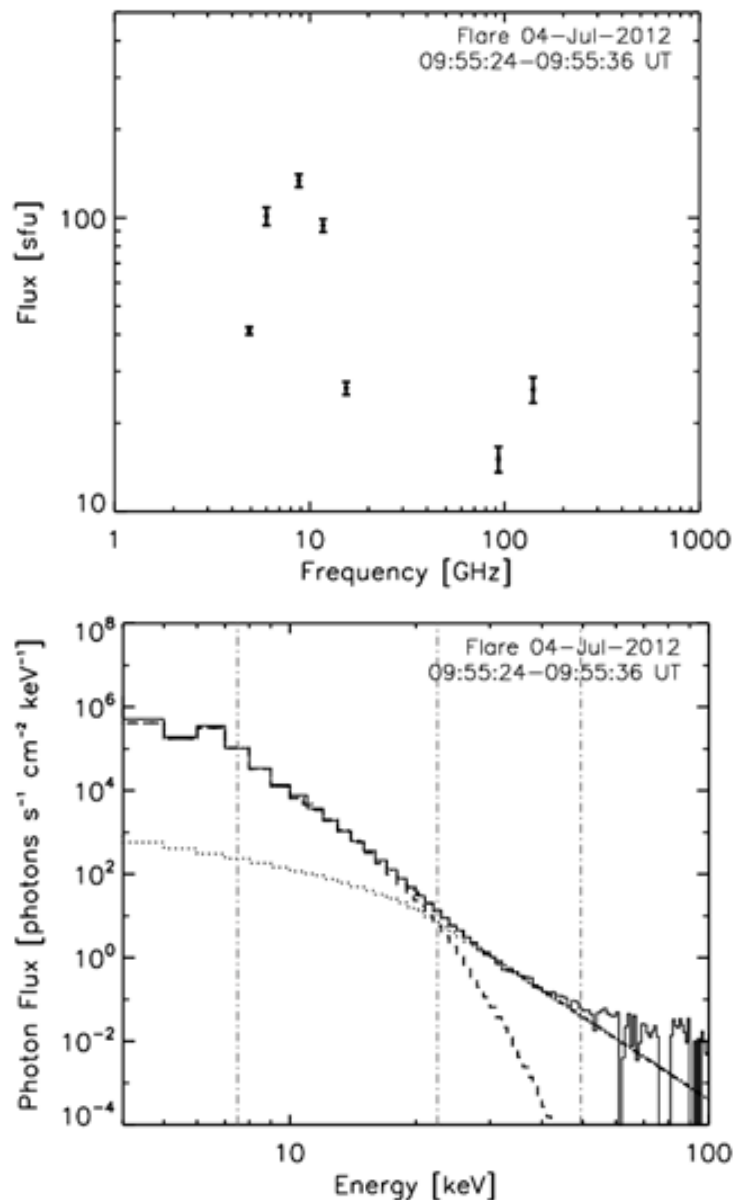


Рис. 2. Микроволновый спектр радиоизлучения вспышки

Спектр был усреднен по временному интервалу для сравнения с рентгеновским спектром по данным RHESSI (рис. 2, правая панель). С помощью процедуры фитирования тепловой части рентгеновского спектра, были получены мера эмиссии $EM=1,02 \cdot 10^{49} \text{ cm}^{-3}$ и температура плазмы в рентгеновском источнике вспышки $T=2,3 \cdot 10^7 \text{ K}$. Фитирование нетепловой части спектра проводилось с помощью модели «толстой мишени». При этом были получены следующие параметры: поток нетепловых электронов $F=4,2 \cdot 10^{35} \text{ s}^{-1}$, спектральный индекс нетепловых электронов $\delta=7,3$.

С помощью данных в ультрафиолете, получаемых космической обсерваторией SDO на инструменте AIA была вычислена дифференциальная мера эмиссии, которая показывает распределение излучения по температурам для имеющихся ультрафиолетовых линий.

Дифференциальная мера эмиссии вычислялась методом регуляризации по следующей формуле [7, 12]:

$$\Phi(T) = n_e^2 \frac{dl}{dT} \quad (1)$$

где n_e – плотность электронов;

l – расстояние вдоль луча зрения.

На рис. 3 представлена дифференциальная мера эмиссии для исследуемой вспышки.

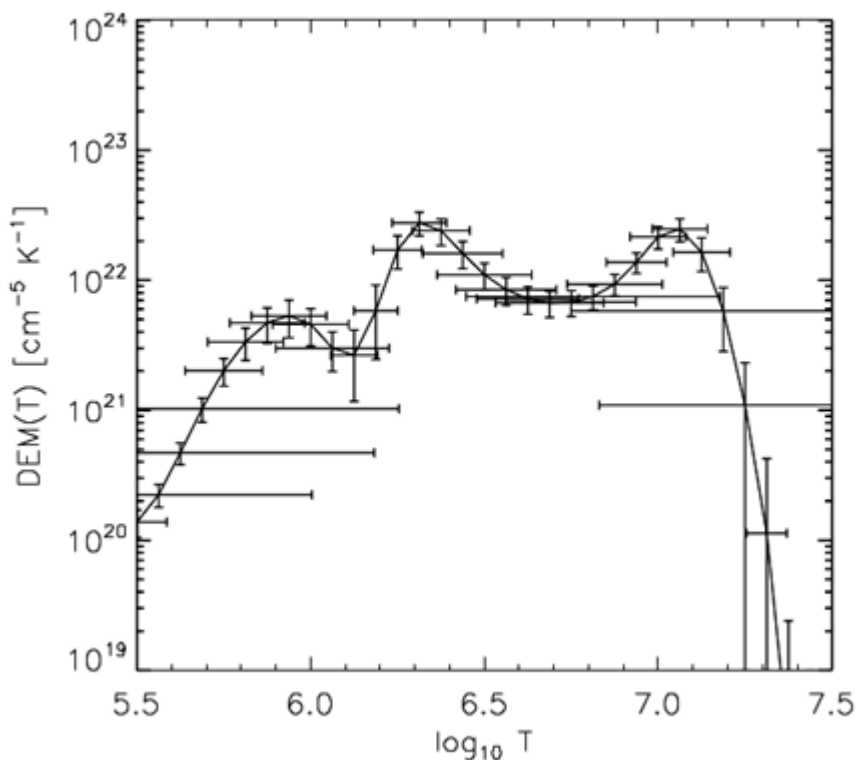


Рис. 3. Дифференциальная мера эмиссии для исследуемой вспышки

Видно, что пик приходится на значение температуры 13 МК, но присутствуют и значения для более холодной корональной плазмы.

2. Моделирование спектра и интерпретация результатов

Используя дифференциальную меру эмиссии, можно вычислить вклад корональной плазмы в диапазоне температур $T=(10^{5,7}-10^{7,3})$ К в тепловое тормозное излучение вспышки.

Коэффициент тормозного поглощения будет [3]:

$$k_{ff} = \left(K \cdot n_e^2 \right) / \left(T^{3/2} \cdot \nu \right)$$

где $K=9,78 \cdot 10^{-3} \cdot \{18,2+\ln T^{3/2}-\ln \nu, T<2 \cdot 10^5$ К, $24,5+\ln T-\ln \nu, T>2 \cdot 10^5$ К}.

Оптическая толщина по расстоянию dl может быть записана в виде:

$$d\tau_v = k_{ff} dl = (Kn_e^2 / T^{3/2} v^2) dl \quad (2)$$

и, в соответствии с уравнениями (1) и (2) $d\tau_v$ может быть преобразована, как:

$$d\tau_v = \int_{T_{min}}^{T_{max}} \left(K \Phi(T) / T^{3/2} v^2 \right) dT \quad (3)$$

где T_{min} и T_{max} соответствуют диапазону температур корональной плазмы.

Используя формулы (1) и (2), можно получить яркостную температуру $T_b(v)$, связанную с физическими параметрами атмосферы в источнике вспышки:

$$T_b(v) = 1 / v^2 \int_{T_{min}}^{T_{max}} (K \Phi(T) / \sqrt{T}) e^{-\tau_v(T)} dT \quad (4)$$

Спектральную плотность потока около Земли F_v можно оценить следующим образом:

$$F_v = 2k_B v^2 / c^2 (T_b(v) S / R^2) \quad (5)$$

где k_B – постоянная Больцмана;

S – проекция площади радиоисточника;

R – расстояние от Земли до Солнца.

Результаты вычислений показали, что корональная плазма, наблюдаемая в диапазоне температур $T=(10^{5,7}-10^{7,3})$ К не может быть ответственна за суб-миллиметровое излучение, поскольку источник излучения становится оптически толстым только на частоте $\nu \leq 1$ ГГц (рис. 4).

Расчеты также показали, что корональная плазма (по данным наблюдений SDO/AIA) может дать существенный вклад в миллиметровое излучение в том случае, если площадь источника теплового излучения будет $S > 10^{18}$ см² [26-28, 30]. Основываясь на полученных результатах, мы можем предположить, что суб-миллиметровое излучение вспышки генерируется относительно холодной плазмой переходного слоя ($T \approx 0,1$ МК).

Вклад такой плазмы в излучение можно получить с помощью хорошо известного выражения для яркостной температуры однородного источника:

$$T_b(v) = T [1 - \exp(-\tau_v)] \quad (6)$$

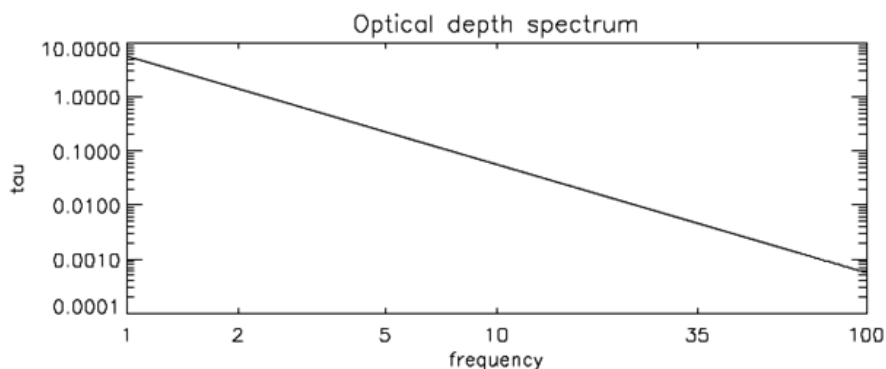


Рис. 4. Дифференциальная мера эмиссии для исследуемой вспышки

В результате, для оптически тонкой корональной плазмы (по данным SDO/AIA) можно получить полный спектральный поток радиоизлучения вспышки:

$$F_{total} = 2k_B\nu^2 / c^2 R^2 (T_{b1}(\nu)S1 + T_{b2}(\nu)S2) \quad (7)$$

где $T_{b1}(\nu)$ и $T_{b2}(\nu)$ – яркостные температуры источников, связанные с относительно холодной плазмой переходного слоя и с корональной плазмой по данным наблюдений SDO/AIA соответственно;

$S1$ и $S2$ – соответствующие площади источников.

Результаты моделирования спектра суб-миллиметрового радиоизлучения с помощью кода Флейшмана-Кузнецова представлены на рис. 5

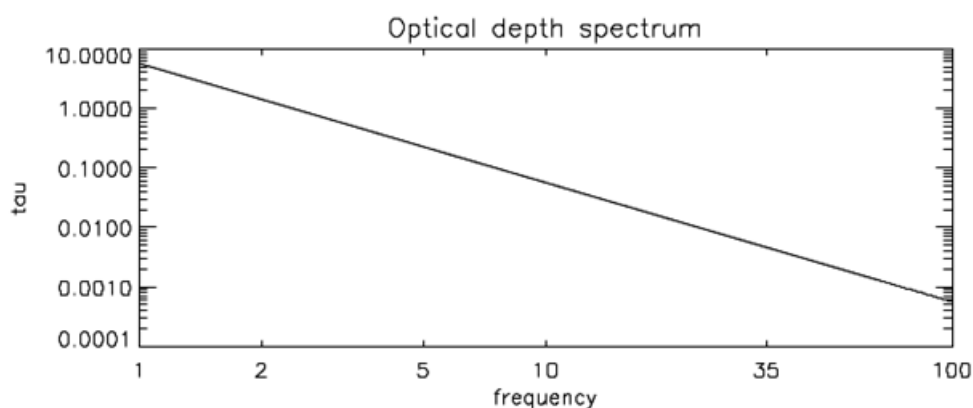


Рис. 5. Результаты моделирования спектра суб-миллиметрового радиоизлучения

Наблюдательные данные, полученные для вспышки 04.07.2012 не дают достаточных ограничений для параметров, вводимых в модель. Нами были использованы следующие параметры для моделирования оптически толстого источника, который приводит к наблюдаемому спектру суб-миллиметрового излучения вспышки (рис.5): площадь источников $S1=S2=4 \cdot 10^{18} \text{ см}^2$, геометрическая глубина источника $l=10^9 \text{ см}$, температура плазмы $T=0,1 \text{ МК}$, концентрация тепловых электронов $n_e=7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Наиболее интересными параметрами данной модели являются довольно большие площади источников излучения $S1$ (горячий, корональный источник) и $S2$ (холодный источник в переходном слое), и оптическая глубина l оптически толстого холодного источника. Важно отметить, что модели довольно больших тепловых источников, с угловыми размерами порядка 60 угл. сек. и с температурой порядка 0,1 МК были предложены ранее в работе [27] для объяснения медленно меняющейся, длительной (>30 минут) компоненты суб-миллиметрового излучения от высокоэнергичных вспышек. В свою очередь, достаточно большое значение l предполагает важный вклад холодных петель переходной области в генерацию суб-миллиметрового радиоизлучения.

Как следует из рис. 1, максимум потока субмиллиметрового радиоизлучения совпадает с максимумом потока в мягком рентгене, что хорошо согласуется с предположением о тепловой природе суб-миллиметрового источника вспышки. Профиль

жесткого рентгеновского излучения в канале (25-50) кэВ содержит два всплеска с максимумами в 09:54:30 и в 09:55:00 UT, в то время как микроволновые временные профили и профиль в канале (50-100) кэВ имели только один максимум около 09:55:00 UT. Такое различие в профилях можно объяснить следующим образом.

Во время вспышечного процесса, высокоэнергичные электроны, ответственные за микроволновое радиоизлучение, ускоряются в короне; электроны, генерирующие жесткое рентгеновское излучение <50 кэВ распространяются в хромосфере, в то время как более энергичные электроны аккумулируются в магнитных петлях благодаря рассеянию. Это приводит к более сглаженным временным профилям потока излучения в микроволновом диапазоне и в канале (50-100) кэВ, в сравнении с профилем в канале (25-50) кэВ.

Сильное, питч-угловое рассеяние частиц может быть причиной эффективной генерации вистлеров, или низкочастотных МГД волн внутри вспышечной петли [8, 13, 25]. Наблюдаемые временные задержки между максимумами микроволнового излучения (рис. 1, панель с) свидетельствуют в пользу данного сценария.

Наблюдаемые потоки суб-миллиметрового излучения вспышки не превышают 40 с.е.п. Однако, даже несмотря на слабое рентгеновское излучение в канале (100-300) кэВ (рис.1, панель b), мы не можем исключить предположение о том, что причиной роста спектра плотности потока излучения вспышки в суб-миллиметровой части может являться гиротронное излучение высокоэнергичных электронов в корональных петлях. Не исключено также, что эффект Разина может играть значительную роль в предложенной модели [14, 20, 21]. Однако, численное моделирование показало, что гиротронное излучение не может быть ответственно за усиление суб-миллиметрового излучения вспышки. Расчет гиротронного суб-миллиметрового источника показал, что поток миллиметрового излучения сильно ослабляется при допустимых параметрах корональной плазмы и магнитного поля, и становится значительно ниже наблюдаемых потоков. Принимая во внимание модельные расчеты, мы можем заключить, что тепловое тормозное излучение плазмы с температурой порядка 0,1 МК является возможным механизмом, ответственным за рост суб-миллиметровой части спектра плотности потока радиоизлучения вспышки 04.07.2012.

Заключение

Было выполнено численное моделирование суб-миллиметровой части спектра плотности потока радиоизлучения для вспышки GOES-класса M5.3, произошедшей 04.07.2012 в активной области 11515 на основе наблюдений, полученных на радиотелескопе РТ-7,5 МГТУ им. Н.Э. Баумана.

На основе модели сделан вывод о том, что причиной роста спектра плотности потока суб-миллиметрового излучения вспышки является тепловое тормозное излучение плазмы с температурой порядка 0.1 МК.

Список литературы

1. Шустиков В.Ю., Шумов А.В., Рыжов В.С., Жильцов А.В. Результаты наблюдений миллиметрового радиоизлучения солнечных вспышек на радиотелескопе РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. № 8. Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/radio/337.html> (дата обращения 01.08.2015).
2. Alissandrakis C.E., Kochanov A.A., Patsourakos S. , Altyntsev A.T., Lesovoi S.V., Lesovoya N.N. Microwave and EUV observations of an erupting filament and associated flare and coronal mass ejections // Publications of the Astronomical Society of Japan (PASJ). 2013. Vol. 65, is. sp 1. Art. no. S8. DOI: [10.1093/pasj/65.sp1.S8](https://doi.org/10.1093/pasj/65.sp1.S8)
3. Chertok I.M., Fomichev V.V., Gorgutsa R.V., Hildebrandt J., Krüger A., Magun A., Zaitsev V.V. Solar radio bursts with a spectral flattening at millimeter wavelengths // Solar Physics. 1995. Vol. 160, is. 1. P. 181-198. DOI: [10.1007/BF00679104](https://doi.org/10.1007/BF00679104)
4. Dulk G.A. Radio emission from the sun and stars // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. 1985. Vol. 23. P. 169-224. DOI: [10.1146/annurev.aa.23.090185.001125](https://doi.org/10.1146/annurev.aa.23.090185.001125)
5. Fleishman G.D., Kontar E.P. Sub-Thz radiation mechanisms in solar flares // The Astrophysical Journal Letters. 2010. Vol. 709, no. 2. P. L127-L132. DOI: [10.1088/2041-8205/709/2/L127](https://doi.org/10.1088/2041-8205/709/2/L127)
6. Fleishman G.D., Kuznetsov A.A. Fast gyrosynchrotron codes // The Astrophysical Journal Letters. 2010. Vol. 721, no. 2. P. 1127-1141. DOI: [10.1088/0004-637X/721/2/1127](https://doi.org/10.1088/0004-637X/721/2/1127)
7. Gimenez de Castro C.G., Trottet G., Silva-Valio A. et al. Submillimeter and X-ray observations of an X class flare // Astronomy & Astrophysics. 2009. Vol. 507, no. 1. P. 433-439. DOI: [10.1051/0004-6361/200912028](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200912028)
8. Hannah I.G., Kontar E.P. Differential emission measures from the regularized inversion of Hinode and SDO data // Astronomy & Astrophysics. 2012. Vol. 539. Art. id. A146. DOI: [10.1051/0004-6361/201117576](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201117576)
9. Huang J., Yan Y., Tsap Y.T. Energetic electron propagation in the decay phase of non-thermal flare emission // The Astrophysical Journal Letters. 2014. Vol. 87, no. 2. Art. id.123. DOI: [10.1088/0004-637X/787/2/123](https://doi.org/10.1088/0004-637X/787/2/123)
10. Kaufmann P., Raulin J.-P., Correia E., Costa J.E.R., Guillermo C., de Castro Giménez, Silva A.V.R., Levato H., Rovira M., Mandrini C., Fernández-Borda R., Bauer O. Solar flare observations at submm-waves // Proceedings of IAU Symposium. Vol. 203. Publ. by Astronomical Society of the Pacific, 2001. P. 283-286.
11. Kaufmann P., Raulin J.-P., Gimenez de Castro C.G., Levato H., Gary D.E., Costa J.E.R., Marun A., Pereyra P., Silva A.V.R., Correia E. A new solar burst spectral component emitting only in the terahertz range // The Astrophysical Journal Letters. 2004. Vol. 603, no. 2. P. L121-L124. DOI: [10.1086/383186](https://doi.org/10.1086/383186)
12. Kaufmann P., Trottet G., Gimenez de Castro C.G., Raulin J.-P., Krucker S., Shih A.Y., Levato H. Sub-terahertz, Microwaves and High Energy Emissions During the 6 December

- 2006 Flare, at 18:40 UT // Solar Physics. 2009. Vol. 255, is. 1. P. 131-142. DOI: [10.1007/s11207-008-9312-7](https://doi.org/10.1007/s11207-008-9312-7)
13. Kontar E.P., Emslie A.G., Piana M., Massone A.M., Brown J.C. Determination of electron flux spectra in a solar flare with an augmented regularization method: application to Rhesi data // Solar Physics. 2005. Vol. 226, is. 2. P. 317-325. DOI: [10.1007/s11207-005-7150-4](https://doi.org/10.1007/s11207-005-7150-4)
14. Kontar E.P., Bian N.H., Emslie A.G., Vilmer N. Turbulent pitch-angle scattering and diffusive transport of hard X-ray-producing electrons in flaring coronal loops // The Astrophysical Journal Letters. 2014. Vol. 780, no. 2. Art. id. 176. DOI: [10.1088/0004-637X/780/2/176](https://doi.org/10.1088/0004-637X/780/2/176)
15. Krucker S., Gimenez de Castro C.G., Hudson H.S., et al. Solar flares at submillimeter wavelengths // The Astronomy and Astrophysics Review. 2013. Vol. 21. Art. id.58. DOI: [10.1007/s00159-013-0058-3](https://doi.org/10.1007/s00159-013-0058-3)
16. Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J., et al. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // Solar Physics. 2012. Vol. 275, is. 1. P. 17-40. DOI: [10.1007/s11207-011-9776-8](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9776-8)
17. Lin R.P., Dennis B.R., Hurford G.J., et al. The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) // Solar Physics. 2002. Vol. 210, is. 1. P. 3-32. DOI: [10.1023/A:1022428818870](https://doi.org/10.1023/A:1022428818870)
18. Luthi T., Magun A., Miller M. First observation of a solar X-class flare in the submillimeter range with KOSMA // Astronomy & Astrophysics. 2004. Vol. 415. P. 1123-1132. DOI: [10.1051/0004-6361:20034624](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20034624)
19. Raulin J.-P., White S.M., Kundu M.R., Silva A.V.R., Shibasaki K. Multiple Components in the Millimeter Emission of a Solar Flare // The Astrophysical Journal Letters. 1999. Vol. 522, no. 1. P. 547. DOI: [10.1086/322974](https://doi.org/10.1086/322974)
20. Raulin J.P., Makhmutov V.S., Kaufmann P., Pacini A.A., Lüthi T., Hudson H.S., Gary D.E. Analysis of the impulsive phase of a solar flare at submillimeter wavelengths // Solar Physics. 2004. Vol. 223, is. 1. P. 181-199. DOI: [10.1007/s11207-004-1300-y](https://doi.org/10.1007/s11207-004-1300-y)
21. Razin V.A. To the theory of radio emission spectra caused by discrete sources at frequencies lower than 30 MHz // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Radiofizika. 1960. No. 3. P. 584-594.
22. Razin V.A. On the spectrum of nonthermal cosmic radio emission // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Radiofizika. 1960. No. 3. P. 921-936.
23. Rozanov B.A. Millimeter range radio telescope RT-7,5 BMSTU // Reviews of USSR Universities. Part 3. Radio electronics. 1981. Vol. 3. P. 3-10.
24. Silva A.V.R., Share G.H., Murphy R.J., Costa J.E.R., Giménez de Castro C.G., Raulin J.-P., Kaufmann P. Evidence that Synchrotron Emission from Nonthermal Electrons Produces the Increasing Submillimeter Spectral Component in Solar Flares // Solar Physics. 2007. Vol. 245, is. 2. P. 311-326. DOI: [10.1007/s11207-007-9044-0](https://doi.org/10.1007/s11207-007-9044-0)

25. Smirnova V.V., Nagnibeda V.G., Ryzhov V.S., Zhil'tsov A.V., Solov'ev A.A. Observations of sub-terahertz radiation of solar flares with an RT-7.5 radiotelescope // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2013. Vol. 53, is. 8. P. 997-999. DOI: [10.1134/S0016793213080239](https://doi.org/10.1134/S0016793213080239)
26. Stepanov A.V., Tsap Yu.T. Electron-whistler interaction in coronal loops and radiation signatures // *Solar Physics*. 2002. Vol. 211, is. 1. P. 135-154. DOI: [10.1023/A:1022476010960](https://doi.org/10.1023/A:1022476010960)
27. Trottet G, Raulin J., Kaufmann P. et al. First detection of the impulsive and extended phases of a solar radio burst above 200 GHz // *Astronomy and Astrophysics*. 2002. Vol. 381, no. 2. P. 694-702. DOI: [10.1051/0004-6361:20011556](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20011556)
28. Trottet G., Krucker S., Luthi T., Magun A. Radio submillimeter and γ -ray observations of the 2003 October 28 solar flare // *The Astrophysical Journal Letters*. 2008. Vol. 678, no. 1. P. 509-514. DOI: [10.1086/528787](https://doi.org/10.1086/528787)
29. Trottet G., Raulin J.-P., Gimenez de Castro G., Lüthi T., Caspi A., Mandrini C.H., Luoni M.L., Kaufmann P. Origin of the submillimeter radio emission during the time-extended phase of a solar flare // *Solar Physics*. 2011. Vol. 273, is. 2. P. 339-361. DOI: [10.1007/s11207-011-9875-6](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9875-6)
30. 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.
31. White S.M., Kundu M.R. Solar observations with a millimeter-wavelength array // *Solar Physics*. 1992. Vol. 141, is. 2. P. 347-369. DOI: [10.1007/BF00155185](https://doi.org/10.1007/BF00155185)
32. White S.M., Thomas R.J., Schwartz R.A. Updated expressions for determining temperatures and emission measures from GOES soft X-ray measurements // *Solar Physics*. 2005. Vol. 227, is. 2. P. 231-248. DOI: [10.1007/s11207-005-2445-z](https://doi.org/10.1007/s11207-005-2445-z)

Solar Flash Sub-Millimeter Wave Range Spectrum Part Radiation Modeling

V.Yu. Shustikov¹, A.V. Shumov^{1,*}, Yu.T. Tcap²,
N.A. Jarkova¹, A.S. Morgachev³, G.G. Motorina⁴,
E.P. Kontar⁵, V.G. Nagnibeda⁶, V.S. Ryzhov¹,
V.V. Smirnova⁴, P.V. Strekalova⁶

*shum_ov@mail.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

²Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny, Russia

³Radiophysical Research Institute, Nizhny Novgorod, Russia

⁴Main (Pulkovo) Astronomical Observatory (RAS), St. Petersburg, Russia

⁵University Of Glasgow, Glasgow, Scotland

⁶St. Petersburg State University, SIAI named after Vladimir Sobolev,
St. Petersburg, Russia

Keywords: radiation, sub-millimeter wave range, solar flash, radio telescope, spectrum, plasma

Currently, solar flares are under observation on the RT-7.5 radio telescope of BMSTU. This telescope operates in a little-studied range of the spectrum, at wavelengths of 3.2 and 2.2 mm (93 and 140 GHz), thereby providing unique information about parameters of the chromosphere plasma and zone of the temperature minimum. Observations on various instruments provided relatively small amount of data on the radio emission flare at frequencies close to 93 GHz, and at frequency of 140 GHz such observations were not carried out. For these reasons, data collected from the RT-7.5 radio telescope are of high value (Shustikov et al., 2012).

This work describes modeling and gives interpretation of the reason for raising flux density spectrum of sub-millimeter radio frequency emission using as an example the GOES flare of class M 5.3 occurred on 04.07.2012 in the active region 11515. This flare was observed on the RT-7.5 radio telescope of BMSTU and was described by Shustikov et al. (2012) and by Smirnova et al. (2013), where it has been suggested that the reason for raising radio frequency emission is a bremsstrahlung of the thermal electrons in the hot plasma of the solar chromosphere. Rough estimates of the plasma temperature at the flare source were obtained.

This paper proposes model calculations of the flux density spectrum of the sub-millimeter radio emission based on the gyrosynchrotron Fleischman-Kuznetsov code (Fleishman & Kuznetsov, 2010). Section 1 briefly describes observational data, tools and processing methods used in the work. Section 2 shows results of modeling the flare radio emission. Section 3 discusses results and conclusions.

Numerical modeling the sub-millimeter part of the spectrum of the radio flux density for the GOES flare of class M5.3 has been carried out. This flare occurred in the active region 11515 on 04.07.2012. Modeling was based on the observations on the BMSTU's RT-7.5 radio telescope.

The paper draws conclusion based on the model that the reason for raising flux density spectrum of sub-millimeter radio emission of flare is thermal bremsstrahlung plasma radiation with a temperature of 0.1 mK.

References

1. Shustikov V.YU., Shumov A.V., Ryzhov V.S., Zhiltsov A.V. Observational results of the millimetric radio waves of solar flares by the means of RT-7.5 radio telescope. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*, 2012, no. 8. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/radio/337.html> , accessed 01.08.2015. (in Russian).
2. Alissandrakis C.E., Kochanov A.A., Patsourakos S. , Altyntsev A.T., Lesovoi S.V., Lesovoya N.N. Microwave and EUV observations of an erupting filament and associated flare and coronal mass ejections. *Publications of the Astronomical Society of Japan (PASJ)*, 2013, vol. 65, is. sp 1, art. no. S8. DOI: [10.1093/pasj/65.sp1.S8](https://doi.org/10.1093/pasj/65.sp1.S8)
3. Chertok I.M., Fomichev V.V., Gorgutsa R.V., Hildebrandt J., Krüger A., Magun A., Zaitsev V.V. Solar radio bursts with a spectral flattening at millimeter wavelengths. *Solar Physics*, 1995, vol. 160, is. 1, pp. 181-198. DOI: [10.1007/BF00679104](https://doi.org/10.1007/BF00679104)
4. Dulk G.A. Radio emission from the sun and stars. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1985, vol. 23, pp. 169-224. DOI: [10.1146/annurev.aa.23.090185.001125](https://doi.org/10.1146/annurev.aa.23.090185.001125)
5. Fleishman G.D., Kontar E.P. Sub-Thz radiation mechanisms in solar flares. *The Astrophysical Journal Letters*, 2010, vol. 709, no. 2, pp. L127-L132. DOI: [10.1088/2041-8205/709/2/L127](https://doi.org/10.1088/2041-8205/709/2/L127)
6. Fleishman G.D., Kuznetsov A.A. Fast gyrosynchrotron codes. *The Astrophysical Journal Letters*, 2010, vol. 721, no. 2, pp. 1127-1141. DOI: [10.1088/0004-637X/721/2/1127](https://doi.org/10.1088/0004-637X/721/2/1127)
7. Gimenez de Castro C.G., Trotter G., Silva-Valio A. et al. Submillimeter and X-ray observations of an X class flare. *Astronomy and Astrophysics*, 2009, vol. 507, no. 1, pp. 433-439. DOI: [10.1051/0004-6361/200912028](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200912028)
8. Hannah I.G., Kontar E.P. Differential emission measures from the regularized inversion of Hinode and SDO data. *Astronomy and Astrophysics*, 2012, vol. 539, art. id. A146. DOI: [10.1051/0004-6361/201117576](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201117576)
9. Huang J., Yan Y., Tsap Y.T. Energetic electron propagation in the decay phase of non-thermal flare emission. *The Astrophysical Journal Letters*, 2014, vol. 787, no. 2, art. id.123. DOI: [10.1088/0004-637X/787/2/123](https://doi.org/10.1088/0004-637X/787/2/123)
10. Kaufmann P., Raulin J.-P., Correia E., Costa J.E.R., Guillermo C., de Castro Giménez, Silva A.V.R., Levato H., Rovira M., Mandrini C., Fernández-Borda R., Bauer O. Solar flare ob-

- servations at submm-waves. *Proceedings of IAU Symposium. Vol. 203*. Publ. by Astronomical Society of the Pacific, 2001, pp. 283-286.
11. Kaufmann P., Raulin J.-P., Gimenez de Castro C.G., Levato H., Gary D.E., Costa J.E.R., Marun A., Pereyra P., Silva A.V.R., Correia E. A new solar burst spectral component emitting only in the terahertz range. *The Astrophysical Journal Letters*, 2004, vol. 603, no. 2, pp. L121-L124. DOI: [10.1086/383186](https://doi.org/10.1086/383186)
 12. Kaufmann P., Trottet G., Gimenez de Castro C.G., Raulin J.-P., Krucker S., Shih A.Y., Levato H. Sub-terahertz, Microwaves and High Energy Emissions During the 6 December 2006 Flare, at 18:40 UT. *Solar Physics*, 2009, vol. 255, is. 1, pp. 131-142. DOI: [10.1007/s11207-008-9312-7](https://doi.org/10.1007/s11207-008-9312-7)
 13. Kontar E.P., Emslie A.G., Piana M., Massone A.M., Brown J.C. Determination of electron flux spectra in a solar flare with an augmented regularization method: application to Rhessi data. *Solar Physics*, 2005, vol. 226, is. 2, pp. 317-325. DOI: [10.1007/s11207-005-7150-4](https://doi.org/10.1007/s11207-005-7150-4)
 14. Kontar E.P., Bian N.H., Emslie A.G., Vilmer N. Turbulent pitch-angle scattering and diffusive transport of hard X-ray-producing electrons in flaring coronal loops. *The Astrophysical Journal Letters*, 2014, vol. 780, no. 2, art. id. 176. DOI: [10.1088/0004-637X/780/2/176](https://doi.org/10.1088/0004-637X/780/2/176)
 15. Krucker S., Gimenez de Castro C.G., Hudson H.S., et al. Solar flares at submillimeter wavelengths. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 2013, vol. 21, art. id.58. DOI: [10.1007/s00159-013-0058-3](https://doi.org/10.1007/s00159-013-0058-3)
 16. Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J., et al. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Physics*, 2012, vol. 275, is. 1, pp. 17-40. DOI: [10.1007/s11207-011-9776-8](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9776-8)
 17. Lin R.P., Dennis B.R., Hurford G.J., et al. The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI). *Solar Physics*, 2002, vol. 210, is. 1, pp. 3-32. DOI: [10.1023/A:1022428818870](https://doi.org/10.1023/A:1022428818870)
 18. Lüthi T., Magun A., Miller M. First observation of a solar X-class flare in the submillimeter range with KOSMA. *Astronomy and Astrophysics*, 2004, vol. 415, pp. 1123-1132. DOI: [10.1051/0004-6361:20034624](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20034624)
 19. Raulin J.-P., White S.M., Kundu M.R., Silva A.V.R., Shibasaki K. Multiple Components in the Millimeter Emission of a Solar Flare. *The Astrophysical Journal Letters*, 1999, vol. 522, no. 1, pp. 547. DOI: [10.1086/322974](https://doi.org/10.1086/322974)
 20. Raulin J.P., Makhmutov V.S., Kaufmann P., Pacini A.A., Lüthi T., Hudson H.S., Gary D.E. Analysis of the impulsive phase of a solar flare at submillimeter wavelengths. *Solar Physics*, 2004, vol. 223, is. 1, pp. 181-199. DOI: [10.1007/s11207-004-1300-y](https://doi.org/10.1007/s11207-004-1300-y)
 21. Razin V.A. To the theory of radio emission spectra caused by discrete sources at frequencies lower than 30 MHz. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Radiofizika*, 1960, no. 3, pp. 584-594.
 22. Razin V.A. On the spectrum of nonthermal cosmic radio emission. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Radiofizika*, 1960, no. 3, pp. 921-936.

23. Rozanov B.A. Millimeter range radio telescope RT-7,5 BMSTU. *Reviews of USSR Universities. Part 3. Radio electronics*, 1981, vol. 3, pp. 3-10.
24. Silva A.V.R., Share G.H., Murphy R.J., Costa J.E.R., Giménez de Castro C.G., Raulin J.-P., Kaufmann P. Evidence that Synchrotron Emission from Nonthermal Electrons Produces the Increasing Submillimeter Spectral Component in Solar Flares. *Solar Physics*, 2007, vol. 245, is. 2, pp. 311-326. DOI: [10.1007/s11207-007-9044-0](https://doi.org/10.1007/s11207-007-9044-0)
25. Smirnova V.V., Nagnibeda V.G., Ryzhov V.S., Zhil'tsov A.V., Solov'ev A.A. Observations of sub-terahertz radiation of solar flares with an RT-7.5 radiotelescope. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2013, vol. 53, is 8, pp. 997-999. DOI: [10.1134/S0016793213080239](https://doi.org/10.1134/S0016793213080239)
26. Stepanov A.V., Tsap Yu.T. Electron-whistler interaction in coronal loops and radiation signatures. *Solar Physics*, 2002, vol. 211, is. 1, pp. 135-154. DOI: [10.1023/A:1022476010960](https://doi.org/10.1023/A:1022476010960)
27. Trottet G, Raulin J., Kaufmann P. et al. First detection of the impulsive and extended phases of a solar radio burst above 200 GHz. *Astronomy and Astrophysics*, 2002, vol. 381, no. 2, pp. 694-702. DOI: [10.1051/0004-6361:20011556](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20011556)
28. Trottet G., Krucker S., Luthi T., Magun A. Radio submillimeter and γ -ray observations of the 2003 October 28 solar flare. *The Astrophysical Journal Letters*, 2008, vol. 678, no. 1, pp. 509-514. DOI: [10.1086/528787](https://doi.org/10.1086/528787)
29. Trottet G., Raulin J.-P., Gimenez de Castro G., Lüthi T., Caspi A., Mandrini C.H., Luoni M.L., Kaufmann P. Origin of the submillimeter radio emission during the time-extended phase of a solar flare. *Solar Physics*, 2011, vol. 273, is. 2, pp. 339-361. DOI: [10.1007/s11207-011-9875-6](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9875-6)
30. 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.
31. White S.M., Kundu M.R. Solar observations with a millimeter-wavelength array. *Solar Physics*, 1992, vol. 141, is. 2, pp. 347-369. DOI: [10.1007/BF00155185](https://doi.org/10.1007/BF00155185)
32. White S.M., Thomas R.J., Schwartz R.A. Updated expressions for determining temperatures and emission measures from GOES soft X-ray measurements. *Solar Physics*, 2005, vol. 227, is. 2, pp. 231-248. DOI: [10.1007/s11207-005-2445-z](https://doi.org/10.1007/s11207-005-2445-z)