

Радиостроение

Научно-практический журнал

<http://www.radiovega.su>

Ссылка на статью:

// Радиостроение. 2017. № 06. С. 14–26

DOI: [10.24108/rdeng.0617.0000126](https://doi.org/10.24108/rdeng.0617.0000126)

Представлена в редакцию: 11.10.2017

© НП «НЕИКОН»

УДК 523.9

Наблюдения Солнца на радиотелескопе РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана и моделирование миллиметрового излучения солнечной вспышки 2 апреля 2017 года

Смирнова В.В.^{1,*}, Цап Ю.Т.^{1,2}, Шумов А.В.³,
Моргачев А.С.^{1,4}, Моторина Г.Г.¹,
Рыжов В.С.³, Жаркова Н.А.³,
Кузнецов С.А.¹, Нагнибеда В.Г.⁵

* vvsvid.sm@gmail.com

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,
Санкт-Петербург, Россия

²Крымская астрофизическая обсерватория РАН,
пгт. Научный, Россия

³МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

⁴Научно-исследовательский радиофизический институт
ННГУ им. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

⁵Санкт-Петербургский государственный университет,
НИАИ им. В.В. Соболева, Санкт-Петербург, Россия

Проведено моделирование миллиметрового (93 и 140 ГГц) излучения солнечной вспышки рентгеновского класса М 6.4, зарегистрированной на радиотелескопе РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана 02 апреля 2017 года в активной области NOAA 12644, исходя из данных наблюдений службы Солнца RSTN (4.9, 8.8 и 15.4 ГГц), космических спутников SDO/AIA (ультрафиолет), а также, GOES, RHESSI и Konus-Wind (рентген). Установлено, что спектр плотности потока миллиметрового излучения растет с увеличением частоты в течение всего всплеска. Подобие профилей миллиметрового и мягкого рентгеновского излучения свидетельствует в пользу его тепловой природы. Из расчета дифференциальной меры эмиссии корональной плазмы по данным SDO/AIA, сделан вывод о ее пренебрежимо малом вкладе в миллиметровое излучение вспышки. Тепловое излучение хромосферной вспышечной плазмы в рамках модели атмосферы Machado et.al. (1980) приводит к заниженным в несколько раз значениям потоков миллиметрового излучения по сравнению с наблюдаемыми. Обсуждаются физические следствия полученных результатов.

Ключевые слова: солнце; плазма; вспышки; активные области; моделирование; хромосфера

1. Введение

Понять природу механизмов энерговыделения в солнечных вспышках без адекватной диагностики физических параметров плазмы и магнитных полей невозможно. Между тем суб-терагерцовые (0.1-1 ТГц) радионаблюдения позволяют диагностировать наиболее труднодоступную область для исследователей Солнца - вспышечную хромосферную

плазму. Однако наземные наблюдения в этом диапазоне длин волн проводятся редко из-за слабости сигнала, высоких требований к чувствительности приемной аппаратуры и значительных атмосферных помех, в то время как соответствующие космические проекты находятся лишь на стадии разработки.

В настоящее время на территории России миллиметровые наблюдения Солнца проводятся только на радиотелескопе РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана (Шустиков и др. 2015; Смирнова и др. 2016; Rozanov 1981; Smirnova et al. 2013; Рыжов и др. 2014). Антенна радиотелескопа диаметром 7,75 м имеет приемную аппаратуру для частот 93 и 140 ГГц, (3.2 и 2.2 мм) с установленными в квазиоптической схеме супергетеродинными приемниками. Это позволяет наблюдать выделенную область на солнечном диске в режиме ведения или сканирования одновременно на двух частотах, с пространственным разрешением 2,5 и 1,5 угл. сек на 93 и 140 ГГц соответственно. Временное разрешение зависит от режима наблюдений варьируется от 1 с до 480 с соответственно в режимах непрерывного ведения области и картографирования (Tsap et al., 2016). При наблюдениях в режиме ведения выбранной области на диске Солнца несколько раз производится калибровка сигнала при помощи построения полных солнечных карт и измерения коэффициента поглощения атмосферы на пути следования сигнала. Точность наведения на область составляет порядка 10 угл. сек.

В последнее время все больший интерес вызывает необычное поведение спектрального потока суб-терагерцового радиоизлучения F_ν солнечных вспышек, которое заключается в увеличении потока F_ν с частотой ν (см. обзор, Krucker et al., 2013). На наш взгляд, в подавляющем большинстве случаев его происхождение можно связать с тепловым тормозным механизмом излучения. При этом, несмотря на то, что значительный, если не определяющий вклад в излучение должна вносить хромосферная вспышечная плазма, данный вопрос до сих пор детально не рассматривался.

Цель работы – исследовать природу суб-терагерцового излучения вспышки с положительным наклоном спектра 02 апреля 2017 г., зарегистрированной на радиотелескопе РТ-7.5 на частотах 93 и 140 ГГц. Для решения поставленной задачи нами будут привлечены наблюдения в рентгеновском, ультрафиолетовом и микроволновом диапазонах. По данным SDO/AIA рассчитана дифференциальная мера эмиссии коронального источника и его площадь. На основе модели вспышечной хромосферы Machado et.al. (1980), следующей из оптических спектральных наблюдений солнечных вспышек, будет оценен ее вклад в миллиметровое излучение. Как станет ясно из изложенного ниже, такой подход позволяет не только по-новому взглянуть на полученные ранее результаты, но и дает возможность провести диагностику вспышечной плазмы.

2. Наблюдения

Солнечная вспышка рентгеновского класса M5.4 наблюдалась в активной области NOAA 12644 (N12W60) 02.04.2017 с 07:50:00 по 08:45:00 UT. В это время область находилась вблизи восточного лимба Солнца. На радиотелескопе РТ-7.5 МГТУ вспышка наблюдалась в режиме непрерывного картографирования области уменьшенным кадром

размера 32x15 угл. мин. Заатмосферная плотность потока суб-ТГц излучения вспышки определялась на основе данных о привышении уровня сигнала над фоном активной области для каждого кадра. Затем уровень сигнала пересчитывался в заатмосферную антенную температуру. Далее, на основе данных о коэффициенте использования поверхности антенны рассчитывали заатмосферные плотности потока, максимальные значения которых составили на 140 и 93 ГГц соответственно 153 и 64 с.е.п. (с.е.п. – солнечные единицы потока). Причем с учетом относительной среднеквадратичной погрешности оценок (14%), значение показателя спектра $\alpha = \ln(153/64)/\ln(140/93) \approx 2.13$ хорошо соответствует оптически толстому тепловому источнику излучения.

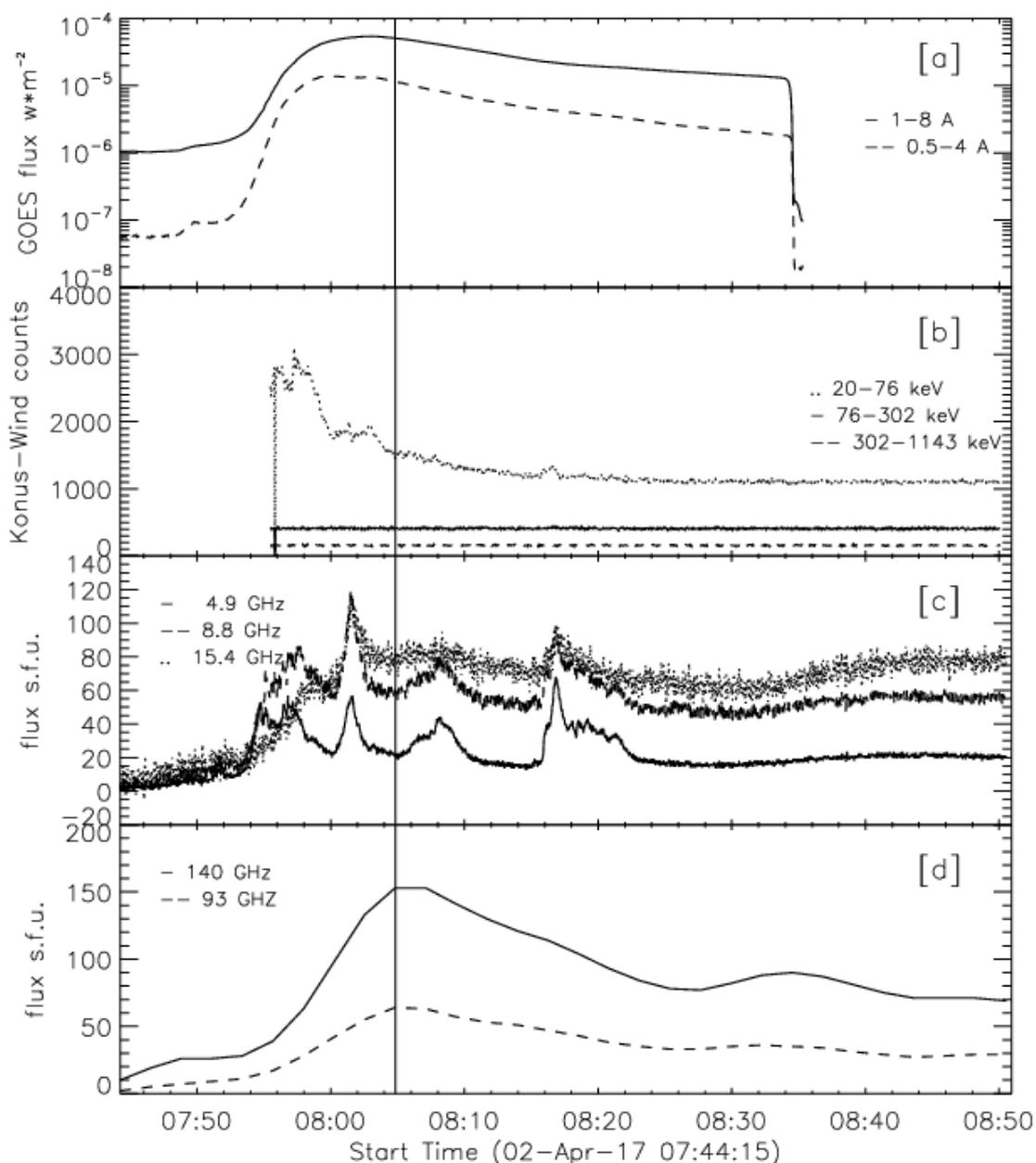


Рис.1. Временные профили спектральных потоков излучения вспышки по данным рентгеновских (GOES, Конус-Винд) и микроволновых (RSTN, PT-7.5) наблюдений.

Временные профили излучения вспышки в различных волновых диапазонах представлены на рис.1. В первую очередь, обращает на себя внимание, что по данным наблюдений на радиотелескопе РТ-7.5 максимальный спектральный поток излучения на 140 ГГц превышал поток на 93 ГГц примерно в три раза. При этом наклон спектра миллиметрового излучения между данными частотами был положительным в течение всего времени наблюдения всплеска (рис.1d). Поведение миллиметровых профилей излучения достаточно хорошо согласуется с временными профилями в мягком рентгеновском диапазоне (рис.1.a), следующих из наблюдений на спутнике GOES (White et al., 2005) в каналах 1-8 и 0.5-4 А. Профили потока микроволнового радиоизлучения, полученные с помощью радиотелескопа службы RSTN (San Vito) на частотах 4.9, 8.8 и 15.4 ГГц (Guidice et al., 1981), имели ярко выраженные пики излучения (рис. 1c), которые, согласно наблюдениям на спутнике Конус-Винд (Artekar et al. 1995) в диапазонах энергий 20-76, 76-302, 302-1143 кэВ, довольно слабо проявлялись и в жестком рентгеновском излучении (рис.1b). Максимум миллиметрового излучения совпал с фазой спада вспышки, наблюдавшейся в жестком рентгеновском диапазоне.

На рис.2 представлен спектр плотности потока радиоизлучения вспышки в момент максимума миллиметрового всплеска, где в суб-ТГц части виден заметный рост потока излучения с частотой, тогда как сантиметровая область имеет вид стандартного «колоколообразного» спектра (Kundu & Vlahos 1982).

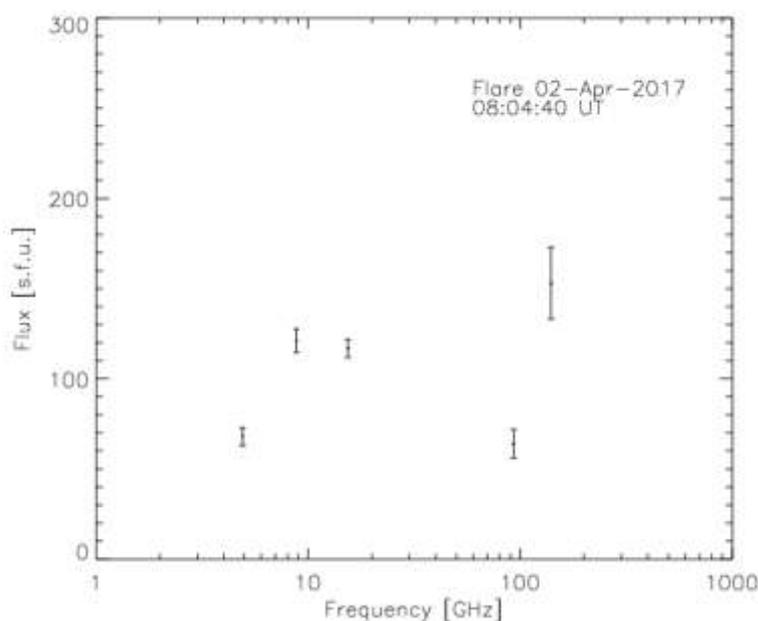


Рис.2. Спектр микроволнового излучения солнечной вспышки 02.04.2017 по данным микроволновых наблюдений на RSTN (4.9, 8.8, 15.4 ГГц) и РТ-7.5 (93, 140 ГГц).

Подобие суб-терагерцовых и мягких рентгеновских профилей может говорить о том, что генерация наблюдаемого миллиметрового радиоизлучения связана с тепловым тормозным механизмом излучения. При этом источник миллиметрового излучения, как уже было отмечено, должен быть оптически толстым, чтобы обеспечить положительный наклон спектра на частотах выше 93 ГГц.

3. Интерпретация

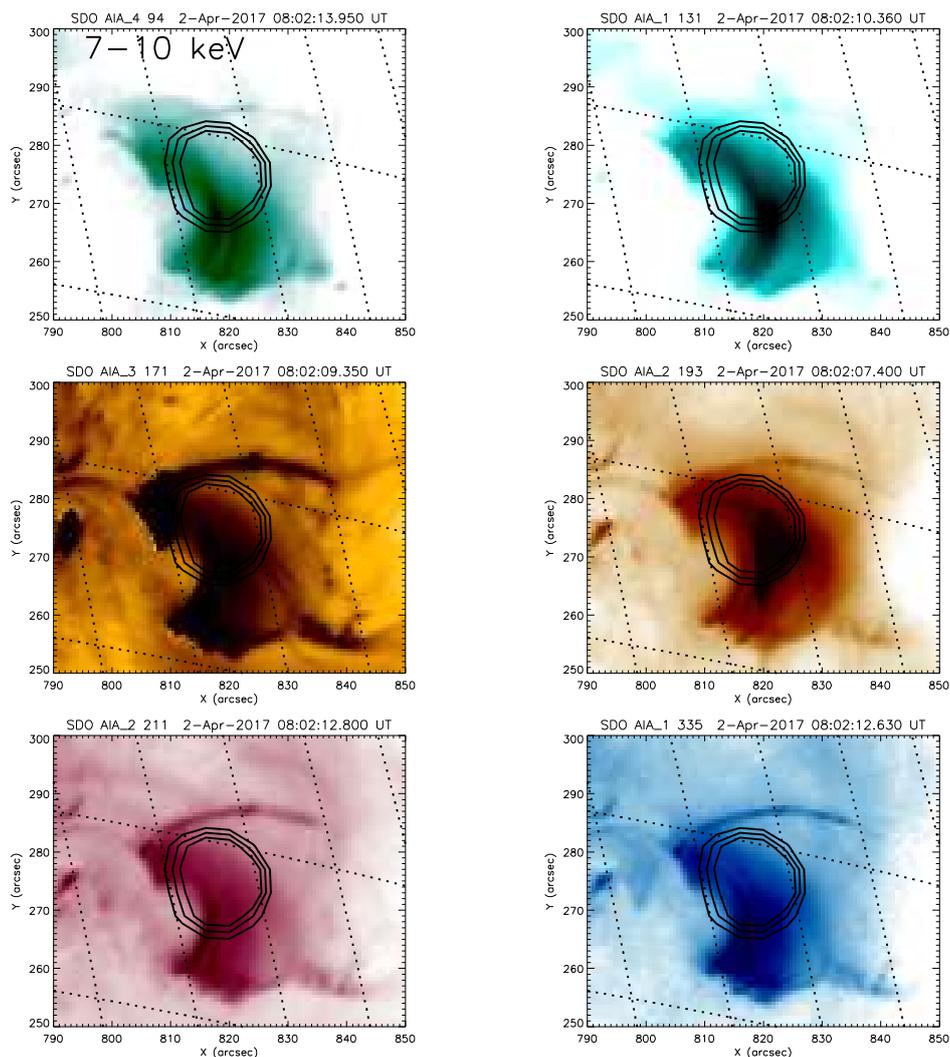


Рис.3. Карты наблюдений источника вспышки 2 апреля 2017 г. в КУФ-диапазоне (94, 131, 171, 193, 211, 335 Å) по данным SDO/AIA с наложенными 20, 30, 50% контурами рентгеновского излучения по данным RHESSI в диапазоне энергий 7-10 кэВ.

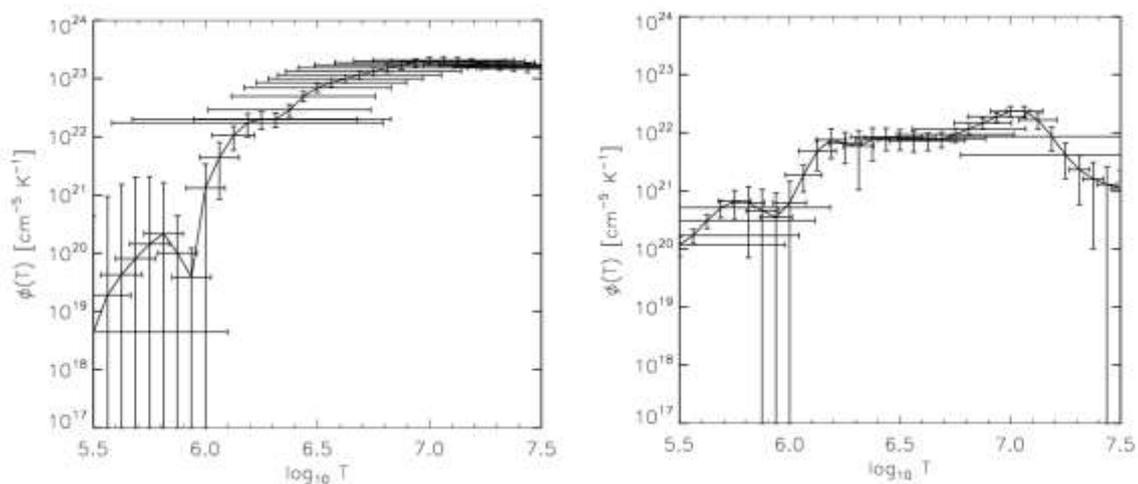


Рис.4. Дифференциальная мера эмиссии. Слева: 08:02:07-08:02:14, справа: 08:35:28-08:35:37.

С помощью данных, полученных в крайнем ультрафиолетовом излучении (КУФ, рис.3), полученных на космическом аппарате SDO/AIA (Lemen et al., 2012), нами была рассчитана методом регуляризации Тихонова (Hannah & Kontar, 2012) зависимость дифференциальной меры эмиссии вспышечной плазмы вдоль луча зрения:

$$\phi(T) = n^2 \frac{dl}{dT}, \quad (1)$$

где n – концентрация тепловых электронов, l – размер источника вдоль луча зрения, от температуры в диапазоне $T = 3 \cdot (10^5 - 10^7) K$ для двух временных интервалов, соответствующих фазам роста и спада миллиметрового всплеска (рис.4). Восстановить дифференциальную меру эмиссию в максимуме вспышки не удалось из-за насыщения детекторов AIA и, как следствие засветки КУФ - карт.

Полученные оценки $\phi(T)$ позволили нам оценить вклад данной тепловой плазмы в наблюдаемое микроволновое излучение, используя известные соотношения (Dulk 1985, Tsap et al. 2016) для интегральных яркостной температуры:

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

и наблюдаемого потока теплового тормозного излучения:

$$F_\nu = \frac{2k_b \nu^2}{c^2} T_b \frac{S}{R^2}, \quad (3)$$

где ν – частота, k_b – постоянная Больцмана, c – скорость света, R – расстояние от Земли до Солнца, S – площадь источника, оптическая толщина источника

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

а коэффициент

$$K = 9.78 \cdot 10^{-3} \cdot (24.5 - \ln(T) - \ln(\nu))$$

для $T > 2 \cdot 10^5 K$.

Площадь теплового источника S определялась с помощью CLEAN алгоритма (Hurford et al., 2002) по картам мягкого рентгеновского излучения в диапазоне энергий 7-10 кэВ, полученным на RHESSI в интервале времени 07:56-07:57 UT. Она соответствовала уровню 50% от максимума интенсивности (рис. 3). Использовались только детекторы 3 и 6, т.к. остальные в период вспышки были неактивны.

На рис. 5 показаны рассчитанные по формулам (2) и (3) спектры микроволнового излучения вспышечной тепловой плазмы, дифференциальная мера эмиссии которой $\phi(T)$ показана на рис. 4, для $S = 1.3 \cdot 10^{18} \text{ см}^2$. Откуда следует, что вклад корональной оптически тонкой плазмы с температурой $T > 3 \cdot 10^5 K$ не превышает 3 s.f.u., т.е. оказывается пренебрежимо малым. Таким образом, относительно горячая вспышечная плазма не может быть ответственна за миллиметровый всплеск.

В связи с этим было бы естественно предположить, что излучение на частотах 93 и 140 ГГц генерируется в солнечной хромосфере и переходном слое, где температура плазмы $T < 3 \cdot 10^5$ К. Для проверки этой гипотезы мы рассмотрели полуэмпирическую модель хромосферы, разработанную Machado et al. (1980). На рис. 6 показаны распределения температуры и электронной концентрации по высоте для спокойного Солнца (сплошная линия), слабой (пунктирная линия) и сильной (штриховая линия) вспышки. Учитывая известное выражение

$$T_b = \int_0^{\tau_v} T e^{-\tau'_v} d\tau'_v$$

и используя формулу (3), мы провели расчет микроволнового спектра столба хромосферной плазмы с параметрами, представленными на рис. 5, приняв, согласно рентгеновским данным, площадь $S = 1.3 \cdot 10^{18} \text{ см}^2$. На рис. 6 сплошной линией показан микроволновый спектр излучения для спокойного Солнца, пунктирной – для модели слабой вспышки, штриховой – для сильной. Видно, что поток излучения спокойного Солнца мал и не превышает нескольких с.е.п. В случае модели слабой вспышки потоки в миллиметровом диапазоне увеличиваются лишь в несколько раз относительно фоновых значений, а для модели сильной вспышки - больше чем на порядок, составив приблизительно 20 и 30 с.е.п. для 93 и 140 ГГц соответственно. Хотя в последнем случае и формируется положительный наклон спектра, однако значения расчетных потоков на порядок меньше наблюдаемых. Отметим также, что значение показателя спектра $\alpha = \ln(F_{140}/F_{93})/\ln(140/93)$ в этом случае оказывается в два раза меньше наблюдаемых значений. Это говорит от несоответствии рассмотренной модели полученным миллиметровым наблюдениям события 02.04.2017.

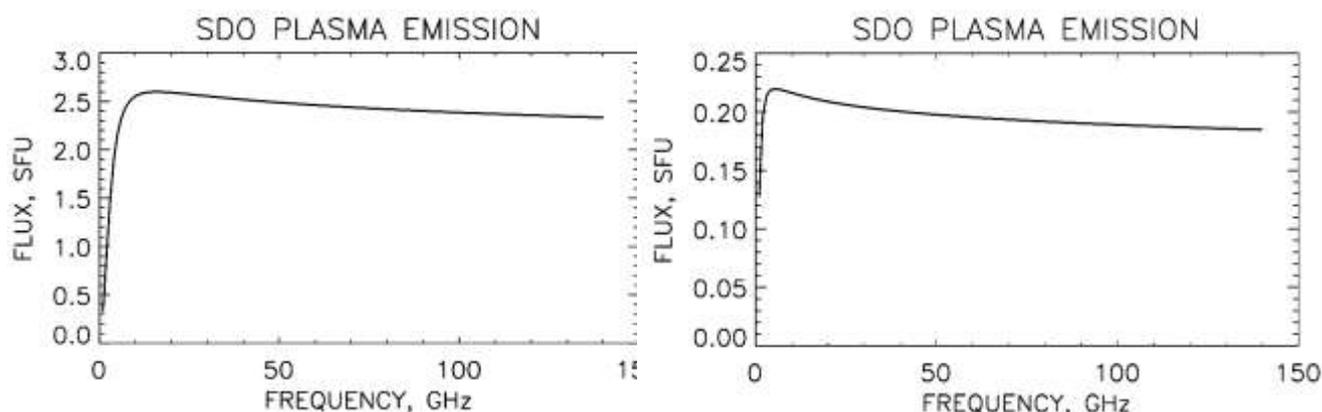


Рис. 5. Спектры теплового тормозного излучения в солнечных единицах потока вспышечной плазмы с температурой $3 \cdot (10^5 - 10^7)$ К коронального теплового источника с дифференциальной мерой эмиссии, показанной на рис. 4, полученные в интервалах времени 08:02:07-08:02:14 UT (слева) и 08:35:28-08:35:37 UT (справа).

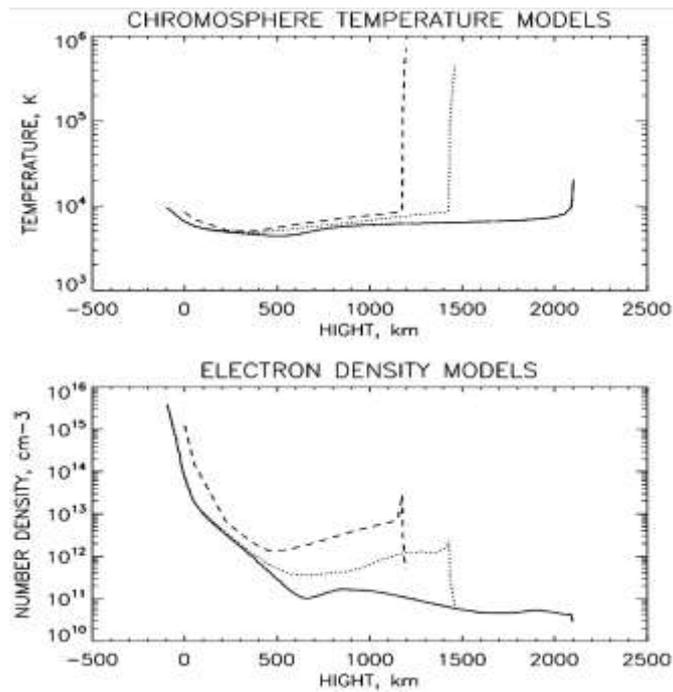


Рис. 6. Зависимость температуры (сверху) и концентрации тепловых электронов (снизу) хромосферной плазмы от высоты для моделей спокойного Солнца (сплошная линия), а также слабой (пунктирная линия) и сильной вспышки (штриховая линия) в терминах Machado et.al. 1980.

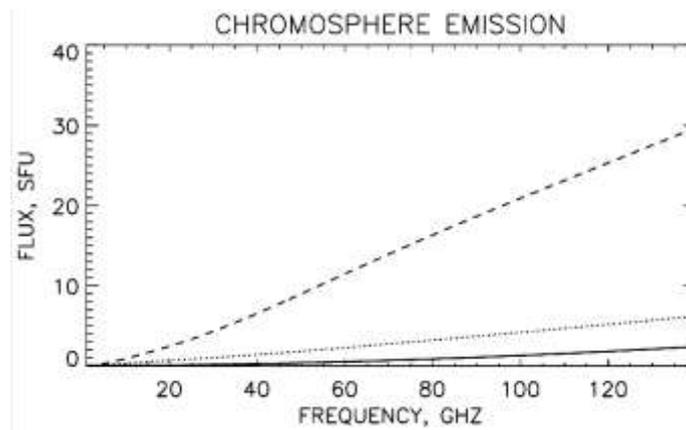


Рис. 7. Микроволновые спектры теплового тормозного излучения в солнечных единицах потока хромосферной плазмы для моделей: спокойного Солнца (сплошная линия), слабой (пунктирная линия) и сильной вспышки (штриховая линия) в терминах Machado et.al. (1980).

4. Обсуждение результатов и выводы

Мы провели анализ одновременных наблюдений микроволнового, ультрафиолетового, рентгеновского излучения солнечной вспышки 2 апреля 2017 с необычным ростом миллиметрового спектра с частотой между 93 и 140 ГГц, обнаруженным на радиотелескопе РТ-7.5 МГТУ им. Баумана. Поведение миллиметрового временного профиля, отличное от сантиметрового и совпадающее с мягким рентгеновским свидетельствует в пользу тепловой природы суб-ТГц всплеска. Однако расчет вклада теплового тормозного излучения

плазмы с температурой $3 \cdot (10^5 - 10^7)$ К, характеристики которой получены по КУФ-наблюдениям на SDO/AIA, показал что он является незначительным.

Мы также рассмотрели возможность генерации миллиметрового всплеска с положительным наклоном спектра в солнечной хромосфере. Был выполнен расчет теплового тормозного излучения вспышечной хромосферной плазмы с модельными параметрами, полученными Machado et al. (1980) из оптических наблюдений, в предположении равенства площадей источников миллиметрового и жесткого рентгеновского излучения. Откуда был сделан вывод, что объяснить наблюдаемый спектр на миллиметровых волнах в рамках рассмотренной теории не удастся. Предположение о большей (в 3- 5 раз) площади суб-ТГц источника хотя и решает проблему малых значений спектральных потоков, тем не менее все равно не позволяет обеспечить необходимый наклон спектра. К тому же, при большой разнице в площадях корональных и хромосферных источников излучения достаточно трудно объяснить подобие временных профилей.

Необходимо также отметить, что ранее, при проведении наблюдений солнечной вспышки 4 июля 2012 на РТ-7.5 был также зафиксирован длительный миллиметровый всплеск с положительным наклоном спектра (Tsap et al. 2016), а потоки в максимуме вспышки на 93 и 140 ГГц составляли соответственно 20 и 30 с.е.п., что хорошо согласуется с моделью вспышечной хромосферы и переходного слоя Machado et al. (1980) в случае сильной вспышки. Вместе с тем полученные результаты убедительно свидетельствуют, что для интерпретации наблюдаемого миллиметрового излучения события 2 апреля 2017 эта модель требует доработки, что и станет предметом наших дальнейших исследований.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ [16-12-10448](#) (Цап, Смирнова). Часть работы выполнена при поддержке грантов РФФИ [15-02-08028 А](#) (Моргачев) и РФФИ 16-32-00535 мол_а (Моторина, Кузнецов).

Список литературы

1. Рыжов В.С., Жильцов А.В., Шумов А.В., Шустиков В.Ю. Долговременные наблюдения миллиметрового радиоизлучения солнечных вспышек на радиотелескопе РТ-7.5 МГТУ // Радиолокация, навигация, связь: XX междунар. науч.-техн. конф.: RLNC-2014 (Воронеж, 15-17 апреля 2014 г.): Труды. Т. 3. Воронеж, 2014. С. 1821-1831.
2. Смирнова В.В., Цап Ю.Т., Шумов А.В., Моргачев А.С., Моторина Г.Г., Рыжов В.С., Жаркова Н.А., Нагнибеда В.Г. Анализ механизмов генерации излучения рентгеновского, микроволнового и миллиметрового диапазонов в плазме солнечной вспышки 5 июля 2012 года // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана: электрон. журн. 2016. № 12. С. 85-97. DOI: [10.7463/1216.0852397](#)
3. Шустиков В.Ю., Шумов А.В., Цап Ю.Т., Жаркова Н.А., Моргачев А.С., Моторина Г.Г., Контарь Э.П., Нагнибеда В.Г., Рыжов В.С., Смирнова В.В., Стрекалова П.В. Моделирование субмиллиметровой части спектра радиоизлучения солнечных вспышек // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана: электрон. журн. 2015. № 9. С. 106-121. DOI: [10.7463/0915.0812079](#)

4. Aptekar R.L., Frederiks D.D., Golenetskii S.V., Ilynskii V.N., Mazets E.P., Panov V.N., Sokolova Z.J., Terekhov M.M., Sheshin L.O., Cline T.L., Stilwell D.E. Konus-W gamma-ray burst experiment for the GGS wind spacecraft // *Space Science Reviews*. 1995. Vol. 71. No. 1-4. Pp. 265-272. DOI: [10.1007/BF00751332](https://doi.org/10.1007/BF00751332)
5. 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)
6. Guidice D.A., Cliver E.W., Barron W.R., Kahler S. The air force RSTN system // *Bull. of the Amer. Astronomical Soc.* 1981. Vol. 13. P. 553.
7. Hannah I.G., Kontar E.P. Differential emission measures from the regularized inversion of Hinode and SDO data // *Astronomy & Astrophysics*. 2012. Vol. 539. ID A146. 14 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201117576](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201117576)
8. Hurford G.J., Schmahl E.J., Schwartz R.A., Conway A.J., Aschwanden M.J., Csillaghy A., Dennis B.R., Johns-Krull C., Krucker S., Lin R.P., McTiernan J., Metcalf T.R., Sato J., Smith D.M. The RHESSI imaging concept // *Solar Physics*. 2002. Vol. 210. No. 1-2. Pp. 61–86. DOI: [10.1023/A:1022436213688](https://doi.org/10.1023/A:1022436213688)
9. Krucker S., Gimenez de Castro C.G., Hudson H.S., Trotter G., Bastian T.S., Hales A.S., Kasparova J., Klein K.-L., Kretschmar M., Luthi T., Mackinnan A., Pohjolainen S., White S.M. Solar flares a submillimeter wavelengths // *Astronomy and Astrophysics Review*. 2013. Vol. 21. No. 1. ID 58. DOI: [10.1007/s00159-013-0058-3](https://doi.org/10.1007/s00159-013-0058-3)
10. Kundu M.R., Vlahos L. Solar microwave bursts - a review // *Space Science Reviews*. 1982. Vol. 32. No. 4. Pp. 405-462. DOI: [10.1007/BF00177449](https://doi.org/10.1007/BF00177449)
11. Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J., Boerner P.F., Chou C., Drake J.F., Duncan D.W., Edwards C.G., Friedlaender F.M., Heyman G.F., Hurlburt N.E., Katz N.L., Kushner G.D., Levay M., Lindgren R.W. The atmospheric imaging assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Solar Physics*. 2012. Vol. 275. No. 1-2. Pp. 17-40. DOI: [10.1007/s11207-011-9776-8](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9776-8)
12. Machado M.E., Avrett E.H., Vernazza J.E., Noyes R.W. Semiempirical models of chromospheric flare regions // *Astrophysical J. Pt. 1*. 1980. Vol. 242. Nov. 15th. Pp. 336-351. DOI: [10.1086/158467](https://doi.org/10.1086/158467)
13. Розанов Б.А. Радиотелескоп ММ диапазона РТ-7.5 МВТУ // *Изв. высших учебных заведений. Сер. Радиоэлектроника*. 1981. Т. 24. № 3. С. 3-8.
14. Smirnova V.V., Nagnibeda V.G., Ryzhov V.S., Zhil'tsov A.V., Solov'ev A.A. Observations of subterahertz radiation of solar flares with an RT-7.5 radiotelescope // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2013. Vol. 53. No. 8. Pp. 997-999. DOI: [10.1134/S0016793213080239](https://doi.org/10.1134/S0016793213080239)
15. Tsap Yu.T., Smirnova V.V., Morgachev A.S., Motorina G.G., Kontar E.P., Nagnibeda V.G., Strekalova P.V. On the origin of 140 GHz emission from the 4 July 2012 solar flare // *Advances in Space Research*. 2016. Vol. 57. No. 7. Pp. 1449-1455. DOI: [10.1016/j.asr.2015.12.037](https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.12.037)
16. 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. No. 2. Pp. 231-248. DOI: [10.1007/s11207-005-2445-z](https://doi.org/10.1007/s11207-005-2445-z)

Solar Observations via Bauman Moscow State Technical University RT-7.5 Radio Telescope and Modeling Millimeter Emission of the Solar Flare on April 2, 2017

V.V. Smirnova^{1,*}, Yu.T. Tsap^{1,2}, A.V. Shumov³,
A.S. Morgachev^{1,4}, G.G. Motorina¹,
V.S. Ryzhov³, N.A. Zharkova³,
S.A. Kuznetsov¹, V.G. Nagnibeda⁵

* vvsvid.sm@gmail.com

¹The Central Astronomical Observatory of RAS at Pulkovo, St. Petersburg, Russia

²Krym Astrophysical Observatory of RAS, Nauchny, Russia

³Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

⁴Scientific Research Radiophysical Institute of the Nizhny Novgorod State University n.a. Lobachevsky, Nizhny Novgorod, Russia

⁵St. Petersburg State University, Scientific Research Astronomical Institute n. a. V. Sobolev, St. Petersburg, Russia

Keywords: sun; radio; radio observations; millimeter emission; solar flares; plasma; flare models; sub-THz radio emission

Presently, in the territory of Russia active millimeter solar observations are under way via Bauman Moscow State Technical University (BMSTU) RT-7.5 radio telescope (Shustikov et al., 2015; Smirnova et al., 2016; Rozanov 1981; Smirnova et al., 2013; Ryzhov et al., 2014). Rozanov 1981; Smirnova et al. 2013; РЫЖОВ и др. 2014). A radio telescope antenna of the 7.75 m diameter with its unique receiving equipment mounted for frequencies of 93 and 140 GHz, (3.2 and 2.2 mm) allows observing the Sun in the mode of tracking area, or scanning, simultaneously at two frequencies. Such observations are a source of the most valuable information on flares - the most powerful solar activity effects. It is impossible to understand a nature of the energy release mechanisms in the solar flares when there is no adequate diagnosis of physical parameters of plasma and magnetic fields. Meanwhile, sub-THz (0.1-1 THz) radio observations make it possible to diagnose the most inaccessible areas for the Sun researchers, i.e. the chromosphere. The ground-based observations in the millimeter range are rare because of high sensitivity requirements for receiving equipment and significant atmosphere disturbances, while the appropriate space projects are just under development. The paper objective is to investigate a nature of the sub-THz emission from the flare with the positive spectral tilt recorded on the RT-7.5

radio telescope on April 2, 2017. To solve this problem, we used observations in the x-ray, ultra-violet, and microwave ranges. Based on the model of the flare Machado et.al. (1980) Chromosphere, a coronal plasma contribution to the millimeter radio emission has been estimated. This approach allows us not only to take a fresh look at the results obtained earlier, but also makes it possible to diagnose in-depth the physical parameters of the flare plasma.

References

1. Ryzhov V.S., Zhil'tsov A.V., Shumov A.V., Shustikov V.Yu. Dolgovremennye nablyudeniia millimetrovogo radioizlucheniia solnechnykh vspyshek na radioteleskope RT-7.5 MGTU [Long-term monitoring of millimeter radio emission of solar flares in the radio telescope RT-7.5 MSTU]. *Radiolokatsiia, navigatsiia, sviaz': XX mezhdunarodnaia nauchno-tekhnicheskaiia konferentsiia* [Radar, navigation, communication: XX Intern. scientific and technical conf.: RLNC-2014 (Voronezh, Russia, April 15-17th, 2014)]: Proc. Vol. 3. Voronezh, 2014. Pp. 1821-1831 (in Russian).
2. Smirnova V.V., Tsap Yu.T., Shumov A.V., Morgachev A.S., Motorina G.G., Ryzhov V.S., Zharkova N.A., Nagnibeda V.G. Analysis of hard X-ray, microwave and millimeter emission in solar flare plasma on 5th July 2012. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2016, no. 12, pp. 85-97.
DOI: [10.7463/1216.0852397](https://doi.org/10.7463/1216.0852397) (in Russian)
3. Shustikov V.Yu., Shumov A.V., Tsap Yu.T., Zharkona N.A., Morgachev A.S., Motorina G.G., Kontar E.P., Nagnibeda V.G., Ryzhov V.S., Smirnova V.V., Strekalova P.V. Solar flash sub-millimeter wave range spectrum part radiation modeling. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2015, no. 9, pp. 106-121. DOI: [10.7463/0915.0812079](https://doi.org/10.7463/0915.0812079) (in Russian)
4. Aptekar R.L., Frederiks D.D., Golenetskii S.V., Ilynskii V.N., Mazets E.P., Panov V.N., Sokolova Z.J., Terekhov M.M., Sheshin L.O., Cline T.L., Stilwell D.E. Konus-W gamma-ray burst experiment for the GGS wind spacecraft. *Space Science Reviews*, 1995, vol. 71, no. 1-4, pp. 265-272. DOI: [10.1007/BF00751332](https://doi.org/10.1007/BF00751332)
5. 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)
6. Guidice D.A., Cliver E.W., Barron W.R., Kahler S. The air force RSTN system. *Bull. of the Amer. Astronomical Soc.*, 1981, vol. 13, p. 553.
7. Hannah I.G., Kontar E.P. Differential emission measures from the regularized inversion of Hinode and SDO data. *Astronomy & Astrophysics*, 2012, vol. 539, ID A146. 14 p.
DOI: [10.1051/0004-6361/201117576](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201117576)
8. Hurford G.J., Schmahl E.J., Schwartz R.A., Conway A.J., Aschwanden M.J., Csillaghy A., Dennis B.R., Johns-Krull C., Krucker S., Lin R.P., McTiernan J., Metcalf T.R., Sato J., Smith D.M. The RHESSI imaging concept. *Solar Physics*, 2002, vol. 210, no. 1-2, pp. 61–86. DOI: [10.1023/A:1022436213688](https://doi.org/10.1023/A:1022436213688)

9. Krucker S., Gimenez de Castro C.G., Hudson H.S., Trotter G., Bastian T.S., Hales A.S., Kasparova J., Klein K.-L., Kretschmar M., Luthi T., Mackinnan A., Pohjolainen S., White S.M. Solar flares at submillimeter wavelengths. *Astronomy and Astrophysics Review*, 2013, vol. 21, no. 1, ID 58. DOI: [10.1007/s00159-013-0058-3](https://doi.org/10.1007/s00159-013-0058-3)
10. Kundu M.R., Vlahos L. Solar microwave bursts - a review. *Space Science Reviews*, 1982, vol. 32, no. 4, pp. 405-462. DOI: [10.1007/BF00177449](https://doi.org/10.1007/BF00177449)
11. Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J., Boerner P.F., Chou C., Drake J.F., Duncan D.W., Edwards C.G., Friedlaender F.M., Heyman G.F., Hurlburt N.E., Katz N.L., Kushner G.D., Levay M., Lindgren R.W. The atmospheric imaging assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Physics*, 2012, vol. 275, no. 1-2, pp. 17-40. DOI: [10.1007/s11207-011-9776-8](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9776-8)
12. Machado M.E., Avrett E.H., Vernazza J.E., Noyes R.W. Semiempirical models of chromospheric flare regions. *Astrophysical J.*, pt. 1, 1980, vol. 242, Nov. 15th, pp. 336-351. DOI: [10.1086/158467](https://doi.org/10.1086/158467)
13. Rozanov B.A. Millimeter range radio telescope RT-7.5 BMSTU. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenij. Ser. Radioelektronika* [Reviews of USSR Universities. Radioelectronics], 1981, vol. 24, no. 3, pp. 3-8 (in Russian).
14. Smirnova V.V., Nagnibeda V.G., Ryzhov V.S., Zhil'tsov A.V., Solov'ev A.A. Observations of subterahertz radiation of solar flares with an RT-7.5 radiotelescope. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2013, vol. 53, no. 8, pp. 997-999. DOI: [10.1134/S0016793213080239](https://doi.org/10.1134/S0016793213080239)
15. Tsap Yu.T., Smirnova V.V., Morgachev A.S., Motorina G.G., Kontar E.P., Nagnibeda V.G., Strekalova P.V. On the origin of 140 GHz emission from the 4 July 2012 solar flare. *Advances in Space Research*, 2016, vol. 57, no. 7, pp. 1449-1455. DOI: [10.1016/j.asr.2015.12.037](https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.12.037)
16. 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, no. 2, pp. 231-248. DOI: [10.1007/s11207-005-2445-z](https://doi.org/10.1007/s11207-005-2445-z)