

УДК 520.27; 533.9.082.74; 52-77

Анализ механизмов генерации излучения рентгеновского, микроволнового и миллиметрового диапазонов в плазме солнечной вспышки 5 июля 2012 г.

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

* vvsvid.smimova@yandex.ru

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

²Крымская астрофизическая обсерватория РАН, п. Научный,
Крым, Россия

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

⁴Научно-исследовательский радиофизический институт «Националь-
ный исследовательский Нижегородский государственный универси-
тет им. Н.И. Лобачевского», Нижний Новгород, Россия

⁵Астрономический институт им. В.В. Соболева Санкт-
Петербургского государственного университета,
Санкт-Петербург, Россия

На основе наблюдений на радиотелескопе РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана (93 и 140 ГГц) рассмотрены особенности миллиметровой части спектра излучения солнечной вспышки 5 июля 2012 г. Из полученных с помощью космических орбитальных станций RHESSI, SDO и GOES ультрафиолетовых и рентгеновских данных определены основные параметры тепловых и ускоренных электронов. Установлено, что вкладом корональной фоновой плазмы в миллиметровое излучение можно пренебречь. В предположении единой популяции низкоэнергичных (< 100 кэВ) и высокоэнергичных (> 100 кэВ) частиц обнаруженный на РТ-7.5 рост миллиметрового излучения с частотой может быть связан с генерацией нетеплового гиротронного излучения в хромосфере Солнца.

Ключевые слова: плазма, радиотелескоп, радиоизлучение, суб-миллиметровый диапазон волн, солнечные наблюдения, солнечные вспышки

1. Введение

В настоящее время наземные радионаблюдения играют важную роль в исследовании физических процессов, происходящих на Солнце. Они охватывают широкий наблюдательный диапазон, позволяя дополнить список основных физических параметров изучае-

мых объектов. Однако, в суб-терагерцовом диапазоне ($10^2 - 10^3$ ГГц или 0.3 – 3 мм) таких наблюдений крайне мало из-за многочисленных технических проблем, обусловленных, в частности, относительно низким уровнем полезного сигнала и сильным поглощением коротковолнового радиоизлучения земной атмосферой.

Радиотелескоп РТ-7.5 уже несколько лет ведет постоянные наблюдения Солнца в мало изученном спектральном диапазоне, на частотах 93 и 140 ГГц, что дает уникальную информацию о параметрах плазмы солнечной хромосферы (Шустиков и др. 2015). Основными научными задачами данного телескопа являются наблюдение солнечных вспышек, а также, картографирование диска Солнца и отдельных участков на предмет изучения динамики активных областей. Наблюдения в суб-терагерцовом радиодиапазоне позволяют получить важную информацию не только об электронах с энергией, превышающей сотни МэВ, но и тепловых частицах в области вспышечного энерговыделения (Raulin et al., 1999; Krucker et al., 2013).

Вопрос о происхождении суб-терагерцового излучения солнечных вспышек все еще остается открытым (Krucker et al., 2013). В первую очередь, это объясняется его спектральными характеристиками в диапазоне 200 – 400 ГГц, обнаруженными сравнительно недавно как на импульсной, так и послеимпульсной фазе вспышки (Trottet et al., 2002; Luthi et al., 2004). Оказалось, что некоторые мощные всплески на частотах > 200 ГГц имеют положительный наклон спектра (Kaufmann et al., 2009), т.е. спектральный поток увеличивается с частотой. Хотя отрицательный наклон наблюдается гораздо чаще (Gimenez de Castro et al., 2009), тем не менее общепринятая ранее парадигма, согласно которой суб-терагерцовое излучение солнечных вспышек соответствует либо высокочастотному хвосту спектра гиротронного излучения (отрицательный наклон спектра), либо оптически тонкому тепловому корональному источнику (плоский спектр) тем самым была подвергнута сомнению.

В настоящее время рост суб-терагерцового излучения с частотой в диапазоне 200-400 ГГц связывают с обратным Комптон-эффектом (Kaufmann et al., 2001), гиротронным излучением компактных источников (Silva et al., 2007), черенковским механизмом (Fleishman & Kontar, 2010), тепловым излучением плазмы (Tsap et al., 2016) и даже плазменным механизмом (Zaitsev et al., 2013). Однако перечисленные выше модели сталкиваются с теми или иными трудностями. В частности, в случае реализации теплового механизма приходится предполагать большие площади источников излучения (Trottet et al., 2011). Между тем гиротронный механизм требует привлечения сильных магнитных полей, превышающих несколько тысяч гаусс, и больших концентраций ($\sim 10^{12}$ см $^{-3}$) ускоренных электронов, что едва ли может иметь место в нижней короне Солнца.

На наш взгляд, при построении теоретических моделей многие авторы не учитывают то важное обстоятельство, что в диапазоне 30-100 ГГц положительный наклон спектра встречается довольно часто. Так, согласно патрульным наблюдениям на 19 и 35 ГГц из 115 вспышечных событий (1984-1992 гг.) со спектральным потоком > 100 s.f.u., проведенным в Солнечной радиообсерватории Бернского университета, около 50% событий имеют плоский спектр, тогда как положительный наклон отмечается у 25%. Эти и другие результаты (см. Chertok et al., 1995) предполагают, что положительный наклон спектра не требует привлечения специфичных механизмов излучения. По меньшей мере, для некоторых событий в миллиметровом диапазоне длин волн было бы более естественно его связать с

генерацией нетеплового гиротронного излучения в хромосфере Солнца, где магнитное поле может достигать килогауссовых значений. Однако каких-либо веских указаний в пользу этой гипотезы до сих пор получено не было.

Цель данной работы — рассмотреть особенности рентгеновского, микроволнового и миллиметрового излучения события 5 июля 2012 г. и попытаться объяснить положительный наклон суб-терагерцовой части спектра радиоизлучения в рамках единой модели.

2. Наблюдения

Активная область NOAA 1515 появилась на юго-восточном солнечном лимбе 27 июня 2012 г. Группа пятен была достаточно сложной ($\beta\gamma\delta$ -конфигурация) и показала интересную динамику. В частности, изображения, полученные на SDO/HMI (<http://sdo.gsfc.nasa.gov/>) 1 и 2 июля, свидетельствуют о разделении основного пятна на две части менее чем за 24 часа. В течение следующих двух дней одна из частей стала приближаться к основной пятенной группе и затем "врезалась" в нее, что привело, начиная с 3 июля, к серии вспышек, включая 12 событий рентгеновского класса M.

Миллиметровое радиоизлучение вспышки 5 июля 2012 г. наблюдалось с помощью радиотелескопа РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Данный инструмент представляет собой одиночную полноповоротную параболическую антенну касегреновского типа, диаметром 7.75 м, которая позволяет проводить одновременные двухчастотные наблюдения космических объектов (Rozanov, 1981, Smirnova et al., 2013, Рыжов и др., 2014). Ширина диаграммы направленности антенны составляет 1.5 и 2.5 угл. мин. на частоте 140 и 93 ГГц соответственно. Постоянная времени около 1 с обеспечивает высокую чувствительность приемника (0.3 К). Точность наведения антенной системы составляет 10 угл. сек. Наблюдения солнечной вспышки в двух диапазонах проводились методом непрерывного ведения выбранной активной области в период наблюдательного цикла (05:00-16:00 UT, где UT — Universal Time). Данный метод позволяет получить максимальное временное разрешение, что дает возможность наблюдать все фазы вспышечного процесса.

Перед началом наблюдений строится несколько калибровочных карт солнечного диска с выходом луча антенны на участок неба, для определения поправок наведения на область, а также, для последующего определения яркостной температуры «спокойного солнца» и земной атмосферы на трассе распространения радиоизлучения. Для оценки атмосферного поглощения проводится запись сигнала от активной области, центра солнечного диска (или участок без активных областей) и участка неба на одном и том же зенитном угле. Калибровка сигнала от активной области подробно рассмотрена в работе (Tsap et al., 2016).

Микроволновые измерения проводились с помощью данных, полученных на RSTN (San Vito) на 5.0, 8.8 и 15.4 ГГц с временным разрешением около 1 с. В работе использовались также ультрафиолетовые и рентгеновские данные, полученные из спутниковых наблюдений на SDO/AIA (Lemen et al., 2012), RHESSI (Lin et al., 2002), и GOES (White et al., 2005).

Солнечная вспышка 5 июля 2012 г. класса M6.1, произошедшая в западной части активной области NOAA 1515 (S16W19), где по данным SDO/HMI, магнитное поле на уровне фотосферы не превышало 2 кГс, оказалась одной из наиболее мощных. Вспышечное энерговыделение сопровождалось корональным выбросом массы. Это событие отли-

чало невыразительная импульсная фаза вспышки (Рис.1), а также сложный временной профиль нетеплового излучения, изрезанный минутными пульсациям. Довольно неожиданным представляется и обнаруженный на РТ-7.5 положительный наклон миллиметрового спектра между 93 и 140 ГГц (рис.2). Некоторые наблюдательные параметры данного события были описаны в работе (Шустиков и др., 2012), однако моделирование физических параметров, для интерпретации положительного наклона спектра не проводилось.

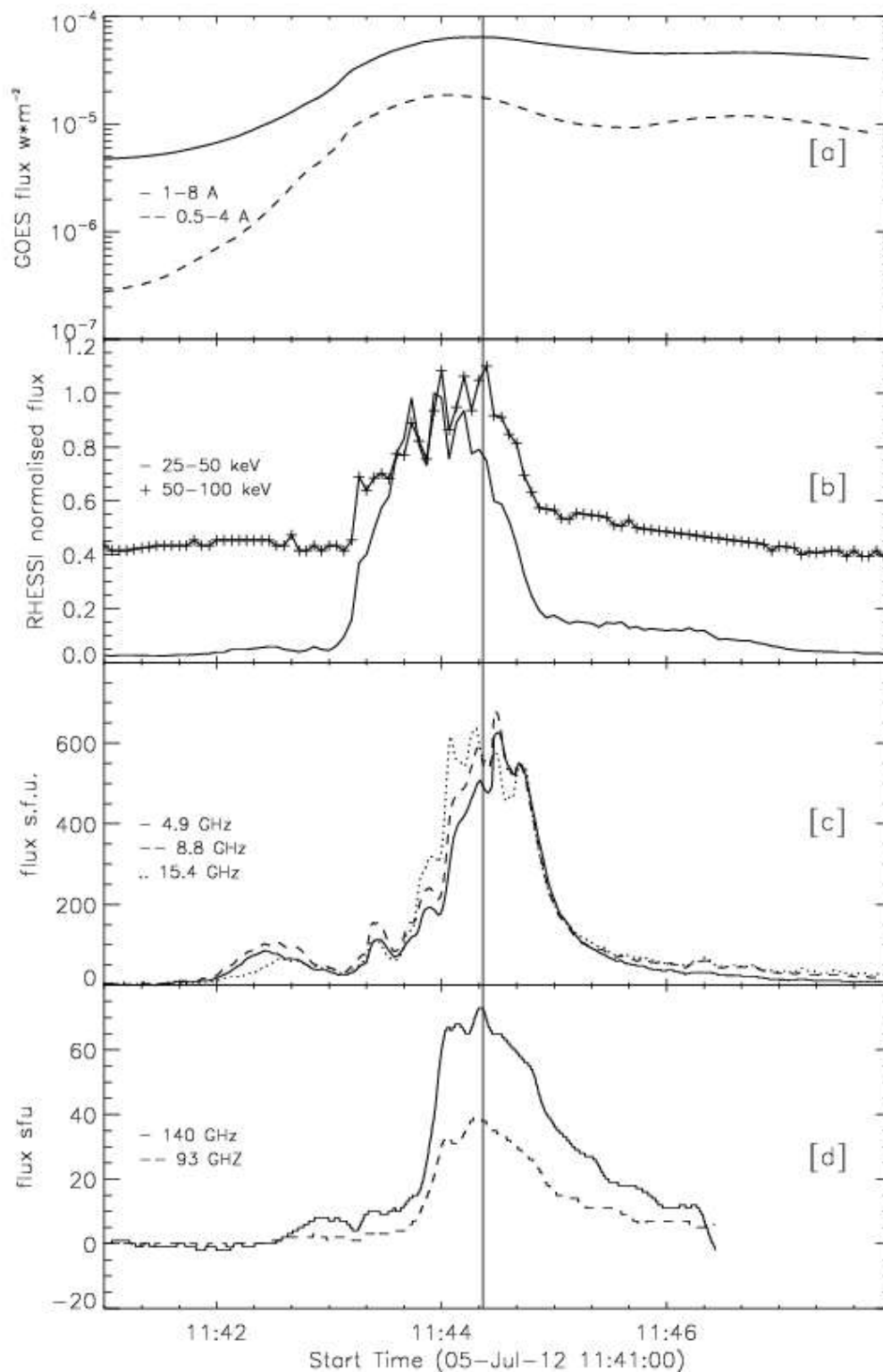


Рис.1.

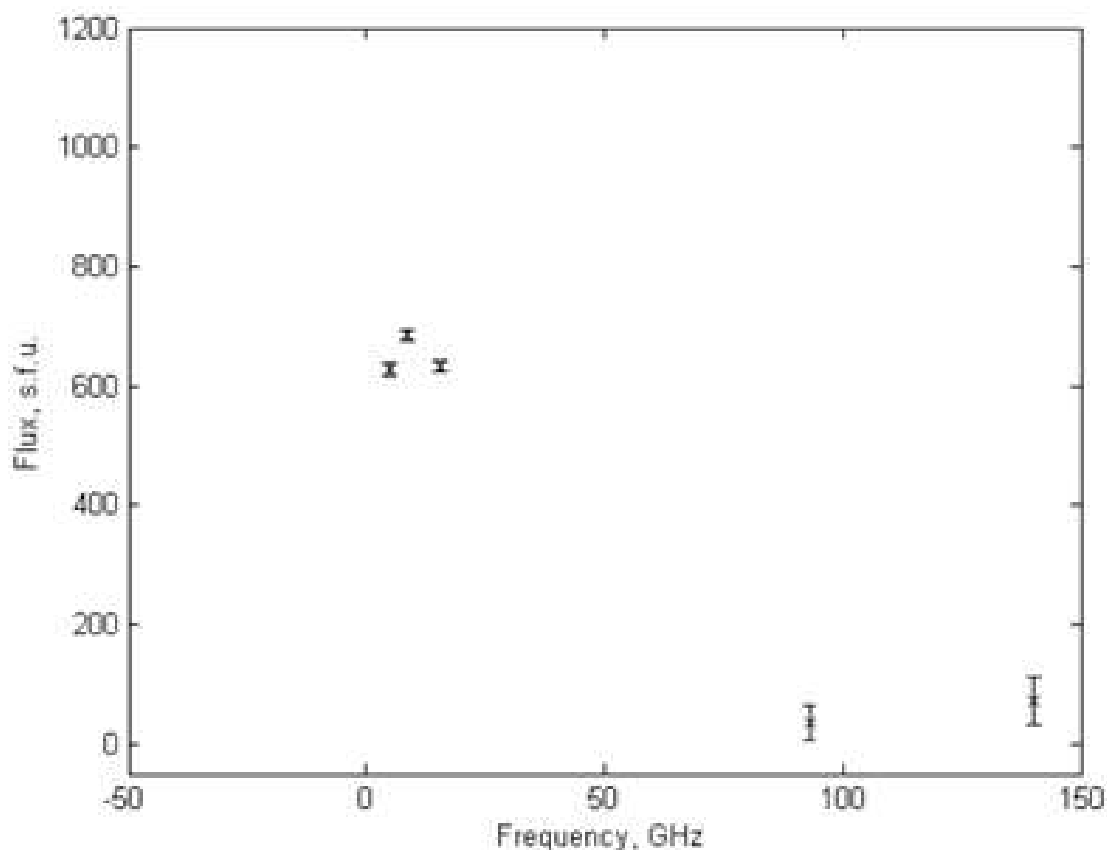


Рис.2.

Подобие временных профилей микроволнового, миллиметрового и жесткого рентгеновского излучения свидетельствует в пользу единой популяции низкоэнергичных (< 100 кэВ) и высокоэнергичных (> 100 кэВ) электронов. Исходя из этой гипотезы, а также результатов фитирования рентгеновских данных, была рассмотрена возможность генерации наблюдаемого миллиметрового радиоизлучения в хромосфере посредством гиросинхротронного механизма, где магнитное поле достигает килогауссовых значений. В этом случае положительный наклон спектра было бы естественно связать с поглощением радиоизлучения на низких частотах в плотной и холодной окружающей плазме.

Используя код Флейшмана-Кузнецова (Fleishman & Kuznetsov 2010), который позволяет производить расчет характеристик гиросинхротронного излучения при заданных параметрах, нами было показано, что наилучшее согласие между наблюдениями и модельными расчетами получается в том случае, если принять площадь источника $8 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, геометрическую толщину $2 \times 10^7 \text{ см}$, магнитное поле 1 кГс, температуру плазмы 0.1 МК, концентрацию тепловых электронов $3 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$, минимальную энергию изотропных ускоренных электронов 100 кэВ, спектральный индекс $\delta=2$, концентрацию 10^6 см^{-3} и угол между магнитным полем и лучом зрения 80 угл. град. (см. рис.3).

Следует подчеркнуть, что принятые нами параметры, соответствуют высоте 1000 – 1500 км, т.е. средней (верхней) хромосфере Солнца и переходной области, где концентрация электронов составляет $10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$, а степень ионизации плазмы варьируется от 0.1

до 1. При этом мы пренебрегли вкладом нейтральных атомов водорода в поглощение радиоизлучения ввиду его малости. Также необходимо отметить, что, согласно наблюдениям, максимальные значения магнитного поля в рассматриваемой активной области на уровне фотосферы находились в пределах 1.5-2 кГс.

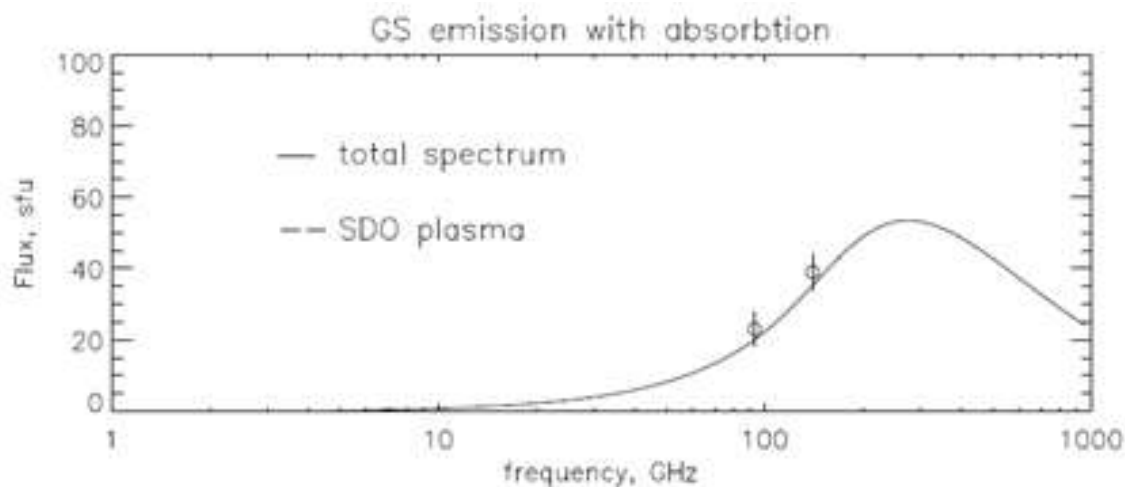


Рис.3.

Возможность появления положительного наклона спектра в горячей корональной плазме за счет эффекта Разина (Razin, 1960) в рассматриваемом случае представляется маловероятным, поскольку, как показывают оценки, в этом случае концентрация электронов должна существенно превышать 10^{12} см^{-3} , что противоречит полученным нами оценкам, следующим из наблюдений. В свою очередь, самопоглощение ускоренными электронами может оказывать существенное влияние на миллиметровое излучение лишь в том случае, если магнитное поле превышает 3000 Гс. Возможность экранирования гиросинхротронного излучения холодным слоем также выглядит маловероятной, поскольку такая модель предполагает слишком большое число ускоренных электронов, а также сильное поглощение микроволнового излучения. Необходимо отметить, что, как показывают оценки, существенный вклад в миллиметровое излучение холодной тепловой плазмы становится возможным только в том случае, если площадь источника тормозного излучения с $T = 10^5 \text{ К}$ составляет $4 \times 10^{18} \text{ см}^2$, что представляется маловероятным.

3. Обсуждение результатов и выводы

В представленной работе было показано, что обнаруженный с помощью радиотелескопа РТ-7.5 между частотами 93 и 140 ГГц положительный наклон спектра миллиметрового излучения солнечной вспышки 5 июля 2012 г. можно объяснить в рамках представлений о единой популяции низкоэнергичных и высокоэнергичных электронов, если ее генерация происходит в хромосфере-переходной области. Это предполагает эффективное ускорение (переускорение) электронов не только в корональной, но и хромосферной части магнитных петель. Электроны могут ускоряться из-за развития желобковой неустойчиво-

сти магнитной петли, где создаются наиболее благоприятные условия для ее развития, связанные с кривизной магнитных силовых линий (Zaitsev, et al. 2000). Не исключена также важная роль пересоединения магнитных силовых линий (Tsap et al., 2012). В связи с этим также отметим, что хромосферное ускорение электронов позволяет решить также ряд проблем, связанных с малой эффективностью генерации жесткого рентгеновского излучения в столкновительной модели толстой мишени (Brown et al., 2009), поскольку лишь 10^{-4} кинетической энергии энергичных частиц трансформируется в рентгеновское излучение. Необходимо отметить, что ранее, для события 4 июля 2012 г., авторы пришли к выводу об определяющем вкладе в миллиметровое излучение тепловой плазмы в диапазоне 100 – 200 ГГц переходной области и верхней хромосферы. Однако вспышка 5 июля 2012 г. оказалась более мощной, в ходе которой потоки жесткого рентгеновского и микроволнового увеличились многократно, что свидетельствует о возросшей роли нетепловой компоненты плазмы. На наш взгляд, именно данное обстоятельство и послужило причиной определяющего вклада в миллиметровое излучение высокоэнергичных электронов.

В заключение следует отметить, что одним из существенных недостатков предлагаемого подхода является отсутствие надежной модели вспышечной хромосферы. Поэтому принятые нами в ходе моделирования значения параметров плазмы носят в какой-то степени произвольный характер. Тем не менее, на наш взгляд, они достаточно адекватно отражают суть рассматриваемого явления. В этой связи чрезвычайно полезными могут оказаться одновременные наблюдения вспышечных событий на РТ-7.5 МГТУ и космической станции IRIS, позволяющей исследовать в ультрафиолетовом диапазоне вспышечные процессы в переходной области и хромосфере Солнца с высоким пространственным и временным разрешением.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-12-10448.

Часть работы выполнена при поддержке грантов РФФИ 15-02-08028 А и РФФИ 16-32-00535 мол_а.

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 // В сборнике: Радиолокация, навигация, связь XX Международная научно-техническая конференция. 2014. С. 1821-1831.
2. 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).

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 суб-миллиметровой части спектра радиоизлучения солнечных вспышек // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. №9. С. 106-121. DOI: [10.7463/0915.0812079](https://doi.org/10.7463/0915.0812079)
4. Brown J.C., Mallick P.C.V. Flare Hard X-Ray Sources Dominated by Nonthermal Recombination // The Astrophysical Journal Letters. Vol. 697. Iss. 1. P. L6-L9. DOI: [10.1088/0004-637X/697/1/L6](https://doi.org/10.1088/0004-637X/697/1/L6)
5. 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)
6. 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)
7. 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)
8. Gimenez de Castro C.G., Trotter 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)
9. 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.
10. Kaufmann P., Trotter 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)
11. 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)
12. 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)
13. 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)
14. 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)

15. 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)
16. 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.
17. 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.
18. 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)
19. 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)
20. 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)
21. 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)
22. Tsap Yu.T., Stepanov A.V., Kopylova Yu.G. Ambipolar diffusion and magnetic reconnection // Astronomy Reports. Vol. 56. Iss. 2. P. 138-145. DOI: [10.1134/S1063772912020084](https://doi.org/10.1134/S1063772912020084)
23. Tsap Y.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. Vol. 57. Iss. 7. P. 1449-1455. DOI: [10.1016/j.asr.2015.12.037](https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.12.037)
24. 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)
25. Zaitsev V.V., Stepanov A.V., Melnikov V.F. Sub-terahertz emission from solar flares: The plasma mechanism of chromospheric emission // Astronomy Letters. Vol. 39. Iss. 9. P. 650-659. DOI: [10.1134/S1063773713090089](https://doi.org/10.1134/S1063773713090089)
26. Zaitsev V.V., Urpo S., Stepanov A.V. Temporal dynamics of Joule heating and DC-electric field acceleration in single flare loop // Astronomy and Astrophysics. Vol. 357. P.1105-1114

Analysis of Hard X-Ray, Microwave and Millimeter Emission in Solar Flare Plasma on 5 July 2012

V.V. Smirnova^{1,*}, Yu.T. Tcap², A.V. Shumov³,
A.S. Morgachev⁴, G.G. Motorina¹, V.S. Ryzhov³,
N.A. Jarkova³, V.G. Nagnibeda⁵

* vvsvvid.smimova@yandex.ru

¹The Central Astronomical Observatory of the Russian Academy
of Sciences at Pulkovo, Saint-Petersburg, Russia

²Crimean Astrophysical Observatory of the Russian Academy
of Sciences, Nauchny, Crimea, Russia

³Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

⁴Scientific Research Institute of Radio Physics of the "National Research
Nizhny Novgorod State University n.a. N.I. Lobachevskii ",
Nizhny Novgorod, Russia

⁵Astronomical Institute .n.a. V.V. Sobolev of the St. Petersburg State
University, St. Petersburg, Russia

Keywords: plasma, radio telescope, radio waves, sub-millimeter waveband, solar observations, solar flares

Bauman Moscow State Technical University's (BMSTU's) radiotelescope RT-7.5 is in continuous operation to observe the active regions on the Sun at frequencies of 93 and 140 GHz (3.2 and 2.2 mm, respectively). A special attention is focused on the observations of solar flares. The given frequency range is understudied, but it allows us to have the unique information about the physical parameters of the chromospheric plasma of flare loops (Shustikov et al. 2015).

The paper is aimed at a detailed study and interpretation of the characteristic features of the spectrum of solar flare radio emission observed using the BMSTU radio telescope RT-7.5 at frequencies of 93 and 140 GHz in case there is a radio flux density growth with frequency. A positive slope of the sub-THz spectrum of radio emission was earlier observed only from time to time at frequencies of 200 and 400 GHz (Kaufmann et al., 2009). Currently, the interpretation of this effect is still under discussion due to a lack of sufficient observational material with the desired frequency resolution in the sub-THz range (Krucker et al., 2013).

The paper, using the July 5, 2012 flare event of X-class GOES M6.1 as an example, through numerical simulation of the radio flux density spectrum shows that the observed positive spectral slope of this flare between the frequencies of 93 and 140 GHz can be explained by available single population of low- and high-energy electrons, the generation of which occurs in the solar chromosphere-transition region of the Sun. It could be suggested that the effective

electron acceleration occurs in the chromosphere, rather than, as previously thought, only at the coronal level.

The section 1 briefly describes the observational data and methods of their obtaining and processing. The section 2 presents the main result of numerical modelling of the radio spectrum. The section 3 offers discussion of results and conclusions.

The work was completed under support of the Russian Science Foundation Grant 16-12-10448 and partly under support of the Grants 15-02-08028 A and 16-32-00535 of the Russian Foundation for Fundamental Research.

References

1. Ryzhov V.S., Zhil'tsov A.V., Shumov A.V., Shustikov V.Iu. Dolgovremennyye nabludeniia millimetrovogo radioizlucheniia solnechnykh vspyshek na radioteleskope RT-7,5 MGTU. 20 *International Scientific and Technical Conference on Radiolocation, Navigation and Communication*. 2014. P. 1821-1831.
2. Shustikov V.Iu., Shumov A.V., Ryzhov V.S., Zhil'tsov A.V. Rezul'taty nabludeniia millimetrovogo radioizlucheniia solnechnykh vspyshek na radioteleskope RT-7.5 MGTU im. N.E. Bauman. *Inzhenernyi 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.
3. Shustikov V.Iu., Shumov A.V., Tsap Iu.T., Zharkova N.A., Morgachev A.S., Motorina G.G., Kontar' E.P., Nagnibeda V.G., Ryzhov V.S., Smirnova V.V., Strekalova P.V. Modelirovanie sub-millimetrovoi chasti spektra radioizlucheniia solnechnykh vspyshek. *Nauka I obrazovanie = Science and education*. Electronic scientific and technical publication. 2015. No. 9. P. 106-121. DOI: [10.7463/0915.0812079](https://doi.org/10.7463/0915.0812079)
4. Brown J.C., Mallick P.C.V. Flare Hard X-Ray Sources Dominated by Nonthermal Recombination. *The Astrophysical Journal Letters*. Vol. 697. Iss. 1. P. L6-L9. DOI: [10.1088/0004-637X/697/1/L6](https://doi.org/10.1088/0004-637X/697/1/L6)
5. 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)
6. 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)
7. 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)
8. Gimenez de Castro C.G., Trotter 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)

9. 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.
10. 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)
11. 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)
12. 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)
13. 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)
14. 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)
15. 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)
16. 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.
17. 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.
18. 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)
19. 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)
20. 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)

21. 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)
22. Tsap Yu.T., Stepanov A.V., Kopylova Yu.G. Ambipolar diffusion and magnetic reconnection. *Astronomy Reports*. Vol. 56. Iss. 2. P. 138-145. DOI: [10.1134/S1063772912020084](https://doi.org/10.1134/S1063772912020084)
23. Tsap Y.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*. Vol. 57. Iss. 7. P. 1449-1455. DOI: [10.1016/j.asr.2015.12.037](https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.12.037)
24. 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)
25. Zaitsev V.V., Stepanov A.V., Melnikov V.F. Sub-terahertz emission from solar flares: The plasma mechanism of chromospheric emission. *Astronomy Letters*. Vol. 39. Iss. 9. P. 650-659. DOI: [10.1134/S1063773713090089](https://doi.org/10.1134/S1063773713090089)
26. Zaitsev V.V., Urpo S., Stepanov A.V. Temporal dynamics of Joule heating and DC-electric field acceleration in single flare loop. *Astronomy and Astrophysics*. Vol. 357. P. 1105-1114