**СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ВСПЫШЕЧНЫХ СОБЫТИЙ М-КЛАССА ПО НАБЛЮДЕНИЯМ
НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РТ-7,5 МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА**

**Смирнова В.В.¹, Цап Ю.Т.^{1,2}, Моргачев А.С.³, Моторина Г.Г.^{1,4},
Рыжов В.С.⁵, Нагнибеда В.Г.⁶**

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

²Крымская астрофизическая обсерватория РАН, пгт. Научный, Россия

³ННГУ им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

⁴Astronomical Institute ASCR, Ondrejov, Czech Republic

⁵Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия

⁶НИИАИ им. В.В. Соболева Санкт-Петербургского государственного университета,
Санкт-Петербург, Россия

**M-CLASS SOLAR FLARE FEATURES OBSERVED
WITH RT-7.5 BMSTU RADIO TELESCOPE**

**Smirnova V.V.¹, Tsap Yu.T.^{1,2}, Morgachev A.S.³, Motorina G.G.^{1,4},
Ryzhov V.S.⁵, Nagnibeda V.G.⁶**

¹Central (Pulkovo) Astronomical Observatory RAS, St. Petersburg, Russia

²Crimean Astrophysical Observatory, RAS, Russia

³Radiophysical Research Institute, Nizhny Novgorod, Russia

⁴Astronomical Institute ASCR, Ondrejov, Czech Republic

⁵Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

⁶Sobolev Astronomical Institute of Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

The comparative analysis of solar flares by GOES class M obtained with the Bauman Moscow State Technical University radio telescope RT-7.5 at frequencies of 93 and 140 GHz is presented. A positive slope of the sub-THz flux density spectrum was revealed for three flares between frequencies 93 and 140 GHz. The observational characteristics of these flares involving data in the X-ray, ultraviolet, and microwave ranges were described.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-357-360

В данной работе мы анализируем все вспышечные события GOES класса М, которые наблюдались на радиотелескопе РТ-7,5 МГТУ им. Н.Э. Баумана за период с 2010 по 2018 гг. Данный радиотелескоп работает на частотах 93 и 140 ГГц. Пространственное разрешение – 2,5 и 1,5 угл. мин. соответственно, позволяет наблюдать за отдельными активными областями [1]. С 2010 по 2018 гг. на РТ-7,5 было зарегистрировано 21 вспышечное событие. Из них, три вспышки показали положительный наклон спектра суб-ТГц излучения между частотами 93 и 140 ГГц. Такой наклон спектра не характерен для «стандартной» вспышки, когда наблюдается па-

дение значения потока радиоизлучения с ростом частоты [Kaufmann et al. 2009].

Мы проанализировали наблюдательные параметры трех вспышек с положительным наклоном спектра, произошедших 04.07.2012, 05.07.2012 и 02.04.2017.

Рис. 1. Спектры плотности потока радиоизлучения вспышек:
а – 04.07.2012, б – 05.07.2012, в – 02.04.2017.

Спектры микроволнового радиоизлучения вспышек были получены с помощью данных RSTN на частотах 4,9, 8,8 и 15,4 ГГц. GOES классы указанных вспышек: M5.4, M6.1 и M5.4 соответственно (рис. 1). Первое событие произошло 04.07.2012 в активной области NOAA 11515. Для анализа данных суб-ТГц излучения вспышки дополнительно были привлечены наблюдения в мягком (GOES, каналы 1–8 Å и 0.5–4 Å и жестком (RHESSI, 25–50, 50–100 и 100–300 keV) рентгене (рис. 2, панели а б и с). Жесткое рентгеновское излучение с энергией фотонов > 50 keV было незначительным и имело только один слабо выраженный максимум на временном профиле. Спектр микроволнового радиоизлучения (рис. 1а) имел максимум на частоте 9 ГГц. Спектр фотонов жесткого рентгеновского излучения имел ступенчатую структуру (рис. 2б). Максимум суб-ТГц излучения совпадает по времени с максимумом мягкого рентгеновского, наступая заметно позже пика сантиметрового и жесткого рентгеновского всплесков, и одновременно с этим имеет присущие им пульсации. Анализ данных наблюдений для двух других вспышек показал различное временное поведение суб-ТГц профилей по сравнению с сантиметровым, мягким и жестким рентгеновским (рис. 3). В событии 5 июля 2012 времена максимумов суб-ТГц, сантиметрового и жесткого рентгеновского всплесков совпадают. Во всех этих диапазонах также одновременно проявляются пульсации излучения. Для вспышки же 2 апреля 2017 временные профили на частотах 93 и 140 ГГц имеют большее сходство с поведением мягкого рентгеновского излучения. Они имеют гладкую форму, на которой не видны пульсации, а максимум излучения наступает позже максимумов во всех остальных диапазонах.

Рис. 2. Временные профили вспышки 04.07.2012 (а), спектр фотонов (б) и распределение дифференциальной меры миссии (в).

Рис. 3. Временные профили вспышек 05.07.2012 и 02.04.2017 (а и б) и распределение дифференциальной меры миссии для вспышки 02.04.2017 (в).

Наблюдения в ультрафиолетовом диапазоне, полученные космическим аппаратом SDO, позволяют проводить восстановление дифференциальной меры эмиссии солнечной плазмы в диапазоне температур от 0.3 до 30 МК (рис. 2в и 3в) [2]. На основе полученных распределений дифференциальной меры эмиссии произведен расчет теплового тормозного излучения плазмы. Показано, что в температурном диапазоне 0.3–30 МК плазма вносит незначительный вклад в наблюдаемое микроволновое излучение и является оптически тонкой в миллиметровом диапазоне. Важно отметить, что в событии 2 апреля 2017 г. присутствуют признаки тепловой природы наблюдаемого суб-ТГц излучения, тогда как импульсный характер временных профилей суб-ТГц излучения вспышек 4.07.2012 и 5.07.2012 указывает на их нетепловую природу. В работах [3, 4] была предложена интерпретация положительного наклона спектра суб-ТГц излучения описанных вспышек, в рамках модели единой вспышечной петли. Была привле-

чена полуэмпирическая модель Мачадо [5] для сильной и слабой вспышки. Результаты показали, что такая модель хорошо описывает суб-ТГц спектр вспышки 4.07.2012, тогда как спектр вспышки 2.04.2017 объяснить с ее помощью не удастся. Было показано, что наблюдаемый в событиях 4 и 5 июля 2012 г. спектр может быть объяснен гиротронным излучением нетепловых электронов единой магнитной петли.

При этом низкочастотная компонента генерируется преимущественно в ее корональной части, а высокочастотная – в основаниях петли, лежащих в хромосфере.

Работа выполнена при поддержке грантов: РФФИ 18-02-00856 А (Цап Ю.Т.), программой КП 19-270 (Смирнова В.В.) «Вопросы происхождения и эволюции Вселенной», научной школы НШ-7241.2016.2 и проектов RVO:67985815, LM2015067: EU-ARC.CZ – National Research Infrastructure by Ministry of Education of the Czech Republic (Моторина Г.Г.) и финансовой поддержке Минобрнауки (госзадание № 3.2722.2017/4.6) (Моргачев А.С.).

Литература

1. Rozanov B.A., Solovjov G.N., Piotrovich V.V., Nagnibeda V.G. The solar observations at the millimeter wave radiotelescope / Finnish-Soviet Symposium on Radio Astronomy. 1988. P. 34-37.
2. Hannah I.G., Kontar E.P. Differential emission measures from the regularized inversion of Hinode and SDO data // A&A. 2012. V. 539. 14 pp.
3. Tsap Y.T., Smirnova, V.V., Motorina, G.G., et al. Millimeter and X-Ray Emission from the 5 July 2012 Solar Flare // Sol. Phys. 2018. 293. 3. 50. 15 pp.
4. Morgachev A.S., Tsap Yu.T., Smirnova V.V., Motorina G.G. Simulation of Subterahertz Emission from the April 2, 2017 Solar Flare Based on the Multiwavelength Observations // Ge&Ae. 2018. 58. 8. pp. 1113-1122.
5. Machado M.E., Avrett E.H., Vernazza J.E., Noyes R.W. Semiempirical models of chromospheric flare regions // ApJ. 1980. P1. V.242. p. 336-351.