СОЛНЕЧНЫЕ СОБЫТИЯ 4–10 СЕНТЯБРЯ 2017 ГОДА: РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ II–IV ТИПОВ (II)

Григорьева И.Ю.¹, Струминский А.Б.²

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

²Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

SOLAR EVENTS ON SEPTEMBER 4–10, 2017: RADIO EMISSION II–IV TYPES (II)

Grigoryeva I.Yu.¹, Struminsky A.B.²

¹Central astronomical observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia

²Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia

The powerful flares of the beginning of September 2017, as the most likely sources of solar energetic particles (protons and electrons) registered near the Earth, are investigated. A comparison is made of time profiles in X-ray (GOES, RHESSI) and in the radio range using available data (RSTN), as well as the intensity of solar electrons (SOHO / EPHIN) in the X2.2 and X9.3 events on September 6, 2017. The detection times of solar radio types II–IV bursts are analyzed. It was shown that two phases of particle acceleration are realized in the considered flares, regardless of the propagating coronal mass ejection. This is evident from the observations of non-thermal processes in the hard X-ray and radio ranges. Apparently, the characteristic of proton flares is type IV radio emission, which is associated with the particle acceleration during the post-eruptive phase of flares.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-127-131

Мощные вспышечные события считаются наиболее вероятными кандидатами в источники солнечных протонов и электронов (солнечных космических лучей – СКЛ) в межпланетной среде. Радиоизлучение III типа, регистрируемое в таких событиях, является одним из указаний на выход частиц, ускоренных во вспышке, в межпланетное пространство [1]. Радиоизлучение II типа связывают с ударной волной выброса корональной массы (СМЕ), которая часто рассматривается как ускоритель частиц, так и место, и средство выхода частиц в межпланетное пространство [2]. Спор о происхождении СКЛ в радиоастрономии, зачастую, сводится к вопросу о том, что лучше коррелирует с событиями СКЛ – радиоизлучение II или III типа (см., например, [3]). При этом забывают, о радиоизлучении IV типа, которое также хорошо коррелирует с событиями СКЛ и, по-видимому, указывает на третий механизм ускорения СКЛ [4].

В работе рассматривается солнечное радиоизлучение, зарегистрированное во вспышках M5.5 4-го, X2.2 и X9.3 6-го и X8.2 10 сентября 2017 года. Качественный анализ радиоизлучения этих вспышек по методике ИЗМИРАН приведен в работе [5]. Детальное исследование радиоизлучения в диапазоне 18–3 ГГц (EOVSA) и жесткого рентгена (RHESSI) зарегистри-

стрированного во вспышке X8.2 10 сентября 2017 года, приведено в работе [6]. Вспышка X2.2 6 сентября 2017 года, в которой не регистрировалось радиоизлучение II–IV типов, была источником чисто электронного собы-

Рис. 1. Временные профили вспышечного излучения и зарегистрированные ускоренные электроны в событии X2.2 6 сентября 2017. *Вверху:* поток усред. за 1 мин. SXR-излучения (GOES, штриховая и сплошная плавные линии), HXR-всплеск (RHESSI, сплошная, пунктирная, штриховая кривые в каналах с энергиями 3–6, 6–12 и 12–25 кэВ; линии в градации серого – излучение в каналах 25–50, 50–100 и 100–300 кэВ). Верт. шкалы – значения потока W/m^2 , буквы – соответствующий балл (справа) и скорость счета в секунду (слева). *Внизу:* запись всплеска на микроволнах (RSTN, штриховая, пунктирная, штрихпунктирная и коротко-штриховая линии запись на частотах 15.4, 8.83, 4.96 и 2.69 ГГц), количество ускоренных электронов на единичную площадку в секунду с МэВ-энергией (SOHO/EPHIN, черные точки на кривой). Верт. шкалы – плотность потока в s.f.u. (слева, $1 \text{ s.f.u.} = 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$) и количество частиц (справа). Шкалы внизу: время в UT часах и минутах (чч:мм), соответственно. Верт. прямая линия – время пика вспышки по данным GOES.

тия в межпланетной среде. Это видно по соответствию временного профиля интенсивности электронов на нижней панели рисунка 1 (SOHO/EPHIN, <http://www2.physik.uni-kiel.de/SOHO/phpeph/EPHIN.htm>, черные кружки) профилям потока рентгеновского излучения (SXR, GOES и HXR, RHESSI) на верхней панели и всплеску на микроволнах (RSTN, нижняя панель) на

первой фазе вспышки. В других вспышках радиоизлучение III, II и IV типов присутствовало (см., например, рис. 2), согласно сводным отчетам о солнечной активности, составленным американским Центром Предсказания Космической Погоды (the Space Weather Prediction Center) <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/events/>, за исключением вспышки M5.5 4 сентября – не было III типа.

Рис. 2. Временные профили вспыхивающего излучения и зарегистрированные ускоренные электроны в событии X9.3 6 сентября 2017. *Вверху:* поток усред. за 1 мин. SXR-излучения (GOES, штриховая и сплошная плавные линии), количество ускоренных электронов на единичную площадку в секунду с МэВ-энергией (SOHO/EPHIN, черные точки на кривой). Верт. шкалы – значения потока W/m², буквы – соответствующий балл (слева) и количество частиц (справа). *Внизу:* запись радио всплеска (RSTN, штриховая, пунктирная, штрихпунктирная и коротко-штриховая линии запись на частотах 15.4, 8.83, 4.96 и 2.69 ГГц; линии в градации серого – 1415, 410, 245 МГц). Верт. шкалы – плотность потока в s.f.u. (слева, 1 sfu = 10⁻²² W m⁻² Hz⁻¹). Шкалы внизу – время в UT в часах и минутах (чч:мм), соответственно. Верт. прямые линии – время пика вспышки по данным GOES и момент первой регистрации CME на SOHO LASCO_C2. Бары – время регистрации радиоизлучения III типа на частотах 25-170 МГц (пустой), IV-типа на частотах 25-180 МГц (косой штрих) и II типа на частотах 25-81 МГц (сетка-штрих).

Отметим, что выбор начала регистрации радиоизлучения на 15,4 ГГц (однозначно связанного со вспыхивающими процессами) в качестве формального ноль-времени в изучаемых солнечных вспышках, приводит к си-

стематизации временных профилей электронов и протонов (см. таблицу в первой работе авторов [7] в настоящем сборнике). При этом не происходит аналогичной систематизации времен первого появления СМЕ и начала радиоизлучения II типа, также сильно различаются и сами скорости СМЕ наблюдающиеся в событиях. Это является аргументом против ускорения СКЛ ударными волнами на фронте СМЕ, как это объясняется в работе [8].

На наш взгляд, выше изложенное показывает, что во вспышках реализуются две различные фазы ускорения и продолжительного выхода частиц в межпланетную среду. По-видимому, характеристикой протонных вспышек является IV тип радиоизлучения, который связан с ускорением частиц на постэруптивной фазе вспышек [9].

Авторы благодарят докторов ф.-м. наук (ИЗМИРАН) В.Н. Обридко и Г.Г. Чернова за полезные комментарии. Все данные, которые упомянуты в этой работе (GOES, RSTN, RHESSI, SOHO/EPHIN) находятся в открытом доступе.

Работа, выполненная Григорьевой И.Ю. (ГАО РАН), осуществлялась по программе «Энерговыделение»; Струминским А.Б. (ИКИ РАН) – за счет субсидии программы «Плазма».

Литература

1. *Cane, H.V., Erickson, W.S., Prestage, N.P.* // J. of Geophys. Res. (Space Physics), 2002, vol. 107 (A10), id. 1315.
2. *Cliver, E.W., Kahler, S.W., Reames, D.V.* // Astrophys. J., 2004, vol. 605, p. 902.
3. *Cliver, E.W., Ling, A.G.* // Astrophys. J., 2009, vol. 690, p. 598.
4. *White, S.M.* // Asian J. Phys., 2007, vol. 16, p. 189.
5. *Chertok, I.M.* // Geomagnetism and Aeronomy, 2018, vol. 58, No. 4, pp. 457–463.
6. *Gary, D.E.; Chen, B.; Dennis, B.R.; et al.* // ApJ, 2018, vol. 863, id.83, 9 pp.
7. *Григорьева И.Ю., Струминский А.Б.* Солнечные события 4–10 сентября 2017 года: протоны и электроны (I) // 2018, в этом сборнике.
8. *Cliver, E.W.* History of research on solar energetic particle (SEP) events: the evolving paradigm // Proc. IAUS, 2009, vol. 257, p. 401-412.
9. *Chertok, I.M.* Post-Eruption Particle Acceleration in the Corona: A Possible Contribution to Solar Cosmic Rays // 24th ICRC, 1995, vol. 4, p.78.