

ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК И СВЯЗАННЫХ С НИМИ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ, ПРОИЗОШЕДШИХ 4 И 9 АВГУСТА 2011 ГОДА

Шаховская А.Н.¹, Григорьева И.Ю.²

¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Республика Крым, Научный, Россия

²Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

INVESTIGATION OF SOLAR FLARES AND ASSOCIATED PROTON EVENTS THAT OCCURRED ON AUGUST 4 AND 9, 2011

Shakhovskaya A.N.¹, Grigoryeva I.Yu.²

¹Crimean Astrophysical Observatory RAS, Nauchny, Republic of Crimea, Russia

²Main Astronomical (Pulkovo) Observatory RAS, St. Petersburg, Russia

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-365-368>

On August 2–9, 2011, two NOAA active regions 11261 and 11263, with common coronal loops, were productive on the Sun. 5 SXR class M and one Class X flares occurred in these AR. As a result of these flares, 4 proton events occurred: on August 2, 4, 8, and 9. In this work, we study the flares on August 4 and 9 that caused the strongest proton events. Data from the SDO AIA, GOES and RSTN tools are used to analyze these events flares, CME and proton increases, are compared. CME are predominantly accelerated during the development of non-thermal processes in the entire range of heights. The acceleration phase of the CME corona is accompanied by radio bursts at low frequencies.

Две активные области 11261 и 11263 NOAA с общими корональными петлями находились на видимом диске Солнце в начале августа 2011 года. В этих АО произошли 5 SXR вспышек класса М и одна класса Х. В результате этих вспышек произошли 4 солнечных протонных события (СПС) – 2, 4, 8, и 9 августа согласно критерию в $1 \text{ pfu} = (\text{см}^2 \text{ с ср})^{-1} > 10 \text{ МэВ}$ в каталоге СПС [1]. И только два события 4-ого и 9-ого августа 2011 года отвечают критерию СПС в $10 \text{ pfu} > 10 \text{ МэВ}$ каталога [2]. Приход протонов $> 100 \text{ МэВ}$ на 10 мин 9-ого августа соответствует темпу ускорения электронов $\sim 10 \text{ МэВ/с}$, и позднее 20 мин 2-ого и 4-ого августа соответствует уже темпу ускорения электронов $\sim 1 \text{ МэВ/с}$ [3]. В работе [4] была проведена аппроксимацию положений КВМ по данным SOHO_LASCO в двух моделях: 1) LP (Linear-Polynomial), которая учитывает импульсную фазу ускорения КВМ и линейную аппроксимацию всех точек наблюдения LASCO; 2) PB (Polynomial-Ballistic), которая учитывает еще и переменное ускорение в постэруптивной фазе. Аппроксимации данных наблюдений LASCO КВМ (пустые кружки) в событиях 4 и 9 августа LP и PB моделями показаны на рис. 1. Штриховая LP кривая «промахивается» мимо начала нетепловых процессов во вспышках 4 и 9 августа 03:49 UT и 08:00 UT, соответ-

ственно. Сплошная серая РВ кривая «попадает», и соответствует ускорению КВМ во время ускорения электронов >100 кэВ и протонов >100 МэВ [3].

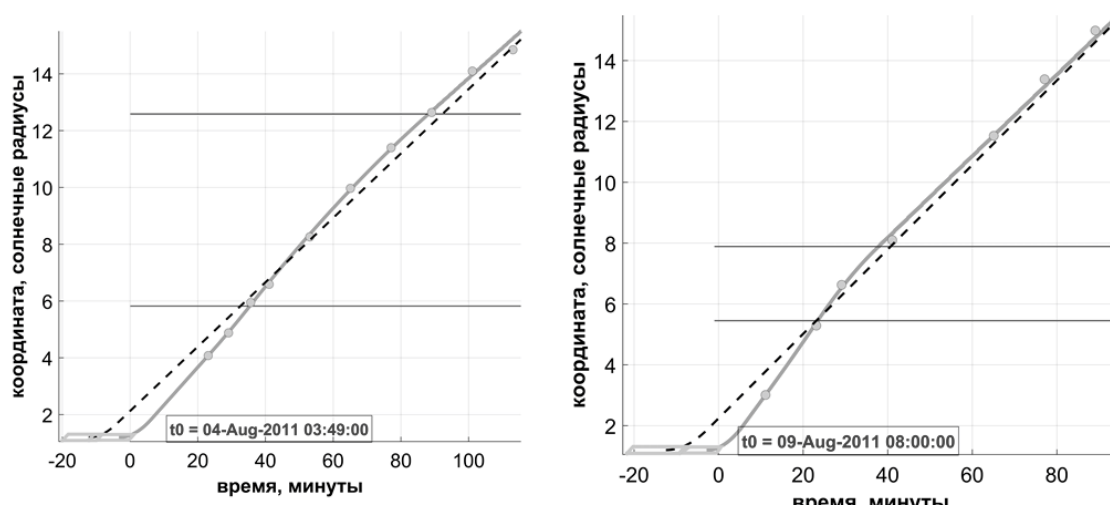


Рис. 1.

По информации о наблюдениях радиовсплесков (RSTN, Radio Solar Telescope Network) за 2–9.08.2011 [5] мы построили гистограмму, где в выбранной АО их количество на различных частотах RSTN нормировано на число всплесков на наиболее встречающейся частоте 245 МГц (рис. 2). Все зарегистрированные всплески проявили себя в короне на частоте 245 МГц (32 штук). Около 40% всплесков (13 штук) соответствуют области ускорения с плазменными частотами 410–610 МГц. Гиротронное излучение >1415 МГц в 30%. Только в 5 всплесках спектр электронов и величина магнитного поля были достаточными для излучения на частоте 15.4 ГГц (жесткое рентгеновское излучение >100 кэВ было только в двух событиях). В нашей работе [6] замечено, что дефицит радиовсплесков на низких частотах не способствует появлению протонных событий.

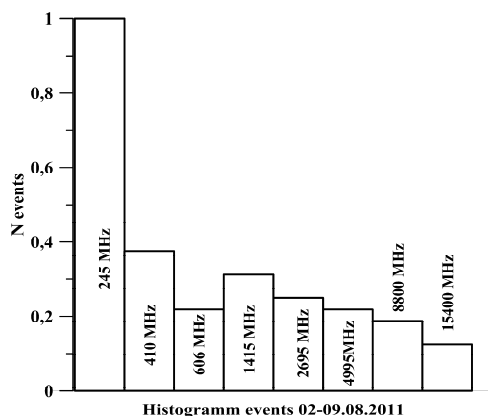


Рис. 2.

На рис. 3 проведено сравнение графиков изменения во времени интегрального EUV излучения (данные SDO AIA) в линиях 304 Å и 94 Å (верхние панели, сплошная и пунктирная кривая, соответственно) и температуры (T) и меры эмиссии (EM) мягкого рентгеновского (SXR) излучения плазмы, определенные по данным GOES (нижние панели, сплошная и пунктирная кривая, соответственно). Слева показаны графики для вспышки 04.08.2011, справа – для вспышки 09.08.2011. Оттенками серого выделены разные фазы развития вспышек.

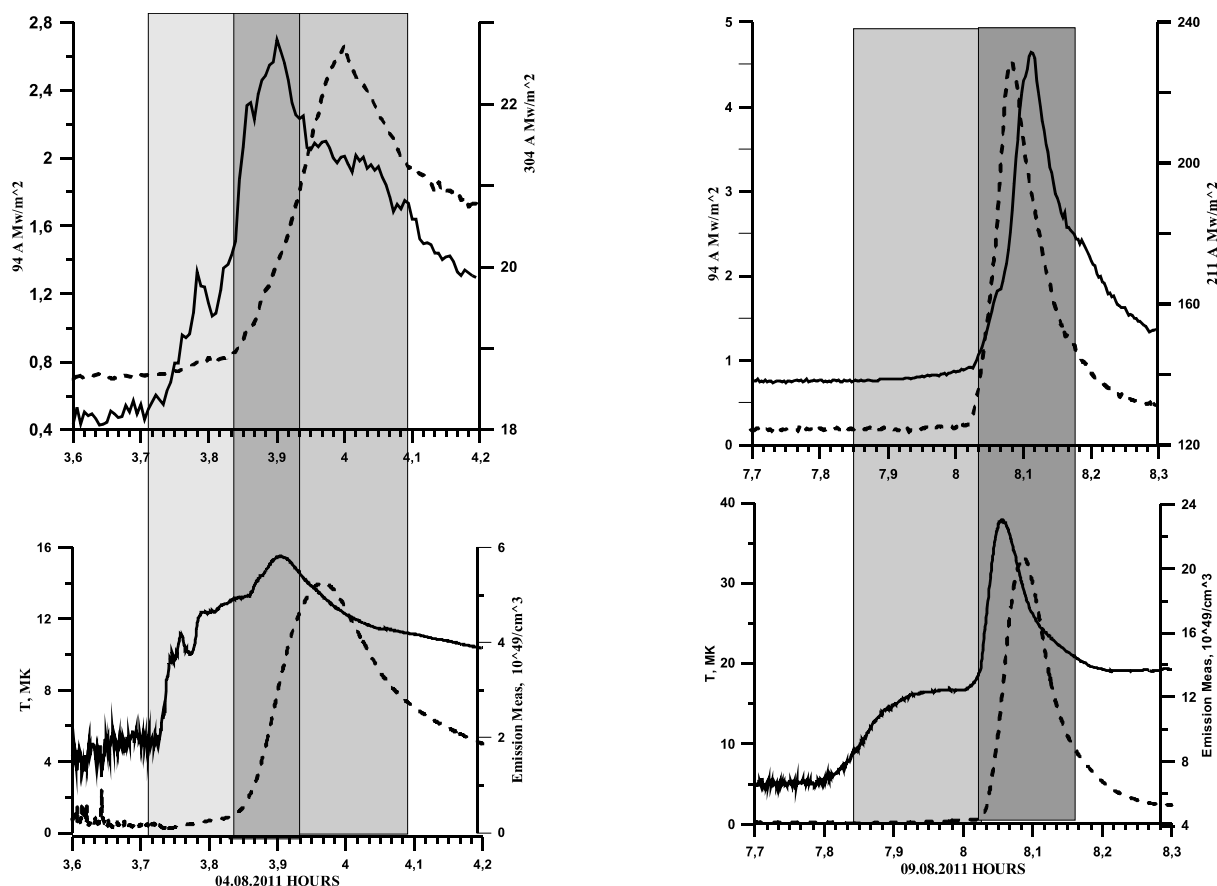


Рис. 3.

1) Согласно представленным данным SDO_AIA 304 Å и 94 Å, RSTN, T и EM (GOES_SXR) 9-ого августа есть выраженная импульсная фаза, а 4-ого импульсная фаза не ярко выраженная (максимум EM запаздывает относительно максимума T больше, чем 9-ого).

2) Обе вспышки начинаются с фазы нагрева, в которой EM(t) растет линейно. Фаза нагрева заканчивается при сопоставимых $T_{\text{SXR}} = 12 \text{ MK}$ и $\text{EM}(10^{49}) = 0.2-0.4$ ($h = 40-50 \text{ Mm}$) независимо от стартовых условий.

3) Из интегрального EUV излучения (SDO AIA) следует:

- 4 августа нет выраженной импульсной фазы, так как T_{SXR} относительно маленькая (греется высоко и долго), что соответствует малым значениям 304 Å (роль хромосферного испарения в росте T_{SXR} слабая); EM_{SXR} соответ-

ствует $94\text{\AA}$: EM_{SXR} медленно растет за счет увеличения объема при постоянной плотности (роль хромосферного испарения слабая), испарившаяся плазма соответствует $94\text{\AA}$;

- 9 августа есть выраженная импульсная фаза T_{SXR} относительно большая (греется низко и быстро), соответствует $94\text{\AA}$ (роль хромосферного испарения в росте T_{SXR} сильная), EM_{SXR} соответствует $304\text{\AA}$: EM_{SXR} быстро растет за счет увеличения плотности и объема (роль хромосферного испарения сильная), испарившаяся плазма соответствует $304\text{\AA}$.

4) Только в 5 из 32 всплесков, зарегистрированных на частоте 245 МГц с 2 по 9 августа, имели и излучение на частоте 15.4 ГГц. В этих 5 случаях спектр электронов и величина магнитного поля были достаточными для генерации излучения 15.4 ГГц.

5) В обеих вспышках T_{SXT} превышает 12МК, начиная с 0-времени. Именно в это время происходит ускорение электронов >100 кэВ и протонов >100 МэВ (вторая фаза ускорения).

6) Темп ускорения электронов 4-ого был почти в 10 раз меньше, чем 9-ого. Это подтверждается откликом ACS SPI на приход протонов.

7) КВМ преимущественно ускоряются во время развития нетепловых процессов во всем диапазоне высот. Фаза доускорения КВМ в короне сопровождается радиовсплесками на низких частотах

Литература

1. https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/docs/SPE_24_Summary_List.pdf
2. <https://umbra.nasco.nasa.gov/SEP/>
3. Григорьева И. Ю., Струминский А. Б., Логачев Ю. И., и др. // Космич. Исслед. 2023. Т. 61. № 3. С. 230–241.
4. Ожередов В.А., Струминский А.Б., Григорьева И.Ю. // G&A, 2023, принято в печать, No. 12,
5. Григорьева И.Ю., Шаховская А.Н., Струминский А.Б. // Развитие эруптивных вспышек на высотах от 0.1 до 0.5 радиусов Солнца, КрАО РАН <https://sun.crao.ru/images/conference/2023/report/Grigorieva.pdf>
6. https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/NOAA/org_events_text/2011/