УДК 537.591.5

# СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ И ПРОТОНЫ ВО ВСПЫШКАХ С ВЫРАЖЕННОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ФАЗОЙ

© 2021 г. А. Б. Струминский<sup>1,</sup> \*, И. Ю. Григорьева<sup>2</sup>, Ю. И. Логачев<sup>3</sup>, А. М. Садовский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Главная астрономическая обсерватория Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

 $^{3}$  $\Phi$ едеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

"Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова",

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

\*E-mail: astrum@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 25.02.2021 г. После доработки 12.03.2021 г. Принята к публикации 28.04.2021 г.

Рассмотрены вспышки с ярко выраженной импульсной фазой, а именно X9.7 (S18W63) 06.11.1997, X6.9 (N17W69) 09.08.2011 и X1.1 (S13W59) 06.07.2012, сопровождавшиеся быстрыми корональными выбросами, потоками релятивистских электронов и протонов >100 МэВ в межпланетном пространстве с подобными временными профилями. Интенсивности электронов и протонов не коррелировали с ускорениями и скоростями корональных выбросов, максимальными потоками нетеплового солнечного излучения. По-видимому, частицы ускорялись стохастически во многих элементарных актах, длительностью меньше самой вспышки, и захватывались вблизи ударного фронта. Потоки частиц определялись условиями их выхода в межпланетное пространство на постэруптивной фазе.

DOI: 10.31857/S0367676521080305

## **ВВЕДЕНИЕ**

Несмотря на длительную историю исследований нерешенным является вопрос о взаимосвязи между вспышками и корональными выбросами массы (КВМ), т.е. о последовательности процессов на Солнце, приводящих к положительной обратной связи между движением и нагревом плазмы, ускорением электронов, а в итоге, к формированию ударных волн и ускорению протонов вплоть до релятивистских энергий. Нам неизвестно точно, где, когда и как ускоряются солнечные космические лучи (СКЛ). Дилемма, что является ускорителем, "вспышка" или "КВМ" продолжает вызывать споры и дискуссии [1–4].

Для выбора определенного механизма ускорения, работающего в солнечных вспышках, критичным является возможность ускорять электроны ~10 МэВ и протоны ~100 МэВ [5]. Электроны ~10 МэВ генерируют радиоизлучение на гиросинхротронных частотах и информация о них ограничена модельными представлениями. Информацию о протонах, взаимодействующих на Солнце, с энергиями от 30 МэВ поставляют ядерные  $\gamma$ -линии, >300 МэВ –  $\pi_0$ -мезоны. Это позволяет получить общий спектр, считая его степенным [6]. Кроме того, потоки СКЛ регистрируются различными космическими аппаратами (КА).

Проблема происхождения СКЛ может быть решена путем совместного анализа данных по возрастаниям интенсивности солнечных электронов 1–10 МэВ и протонов >100 МэВ после эруптивных вспышек сопровождавшихся КВМ, как с сильным, так и слабым ЭМ излучением [4, 7, 8].

Здесь мы будем анализировать наблюдения на Солнце и в межпланетном пространстве (МП), связанные с тремя импульсными вспышками (длительностью мягкого рентгеновского (SXR) излучения <15 мин), их КВМ и СКЛ: 1) 06.11.1997 Х9.7 (S18W63), 2) 09.08.2011 Х6.9 (N17W69) и 3) 06.07.2012 Х1.1 (S13W59) (см. табл. 1). События анализируются относительно начала излучения на 15.4 ГГц – нулевого времени, как это было сделано в [7, 8].

Эти вспышки сопровождались быстрыми KBM (V > 1500 км/c) с ускорениями ( $a \sim 10 \text{ км/c}^2$ ) [9, 10] близкими к предельному [11], потоками релятивистских электронов и протонов >100 МэВ. Первая вспышка связана с наземным возрастанием интенсивности космических лучей (GLE), – единственное наблюдение KBM без предвари-

**Таблица 1.** А – дата, нулевое время UT – начало излучения на 15.4 ГГц, балл и координаты вспышки, Б – начало, максимум и конец SXR вспышки (GOES); В – время  $T_{max}$ , запаздывание  $EM_{max}$  относительно  $T_{max}$ ; Г – время первого появления KBM (LASCO\_C2) и его средняя скорость, начальное ускорение; Д – наименьшая частота регистрируемого радиоизлучения (Radio Solar Telescope Network (RSTN), моменты начала и максимума; Е – момент и величина максимума излучения на 15.4ГГц (СЕП); Ж – начало радио всплесков III, II и IV типов; З – начало роста сглаженных средних потоков протонов >100 МэВ (GOES); электронов 2.64–6.12 кэВ (SOHO/EPHIN) для первой и второй фаз ускорения (см. [7, 8] и ссылки там)

А	06.11.1997 11:51 X9.7/S18W63	09.08.2011 08:01 X6.9/N17W69	06.07.12 23:03 X1.1/S13W59
Б, мин	-2/+4/+10	-5/+5/ +7	-2/+5/+11
В, мин	+3/2	+2/2	+4/2
Γ, мин/км/с/км/с <sup>2</sup>	+19/1556/7.30 [9]	+11/1610 /6.93 [10]	+21/1828/5.87 [10]
Д, МГц/мин	245/-2/+2	245/-1/+1	245/+2/+3
Е, мин/СЕП	+2/9800	+2/1600	+3/1900 (8.8 ГГц)
Ж, мин	?/?/+1	+16/0/+19	+1/+6/+19
3, мин	+24/+2/+28	+14/+3/+14	+40/+2/+29

тельного ускорения коронографом LASCO\_C1 [9]; 2-я — интересна своей экстремальной температурой [12], а 3-я — величиной всплеска в жестком рентгеновском (HXR) диапазоне [13]. Во 2-ой и 3-ей вспышках Fermi/LAT наблюдал длительное γ-излучение >100 МэВ [6, 13].

Задача статьи (в продолжение цикла наших работ по анализу солнечных электронных и протонных событий [4, 7, 8, 14]) — сопоставить времена выхода частиц с особенностями их родительских вспышек и КВМ; оценить возможный вклад в потоки СКЛ отдельных актов ускорения, видимых в нетепловом излучении, эффективность выхода СКЛ в МП на различных высотах КВМ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Временные профили интенсивности электронов 2.64–10.4 МэВ SOHO EPHIN [15] показаны на рис. 1*a*, протонов >100 МэВ GOES [16] – на рис. 1*б*.

В событиях с ярко выраженной импульсной фазой [7, 8, 14] наблюдаются возрастания интенсивности электронов, ускоренных непосредственно в



**Рис. 1.** Временные профили: потока электронов 2.64-10.4 МэВ ЕРНІМ 1 мин средние (06/11/1997 – толстая черная линия, 09/08/2011 – толстая серая линия, 06/07/2012 – тонкая черная линия, стрела – разрыв в данных) (*a*); потока протонов >100 МэВ GOES 5-мин средние (06/11/1997 – открытые кружки, 09/08/2011 – черные квадраты, 06/07/2012 – открытые треугольники, серая линия – сглаженные средние за 25 мин, стрелки – возможное начало протонных возрастаний) (*b*).

ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ том 85 № 8 2021



**Рис. 2.** Сравнение временных профилей производной температуры (серые кривые) и меры эмиссии (черные кривые) с временными профилями μ – излучения (RSTN) и HXR – излучения (пунктирные кривые) в событиях: 06.11.1997 – 15.4 ГГц (*a*) и отсчеты/с в канале 300–1136 кэВ KONUS-WIND (*б*); 09.08.2011 – 15.4 ГГц (*в*) и отсчеты ACS SPI за 50 мс сглаженные за 1 с (20 точек) (*г*); 06.07.2012 – 8.8 ГГц (*д*) и отсчеты ACS SPI за 50 мс, сглаженные средние за 1 с (20 точек) (*е*). Прямые линии показывают ожидаемое положение KBM, перечеркнутые кружки на (*a*) и (*б*) – положение KBM по данным LASCO C1.

ней. По времени их первого прихода можно определить минимальную длину пройденного ими пути, считая, что они были ускорены в нулевой момент. В выбранных событиях такие электроны наблюдались, и длины пройденного ими пути были  $\approx 1.3 \pm 0.1$  а. е. (рис. 1*a* и табл. 1). Для протонов

100 и 500 МэВ (*V*/*c* = 0.43 и 0.76) время запаздывания при такой длине пути будет ~16 ± 2 мин и 6 ± 1 мин. Момент первой регистрации детектором GOES протонов >100 МэВ (табл. 1) определяет время их выхода в МП, которое для рассматриваемых событий будет (+10, 0, +26) мин. Согласно [8] во 2-ом событии возрастание протонов >500 МэВ началось на +10 мин, т.е. время их выхода в МП должно быть (+4 ± 1) мин.

Как было показано [17, 18] в фазе роста интенсивности протонов до максимума преимущественную роль играет инжекция в МП, которая может быть малой интенсивности и большой длительности. Очевидно, что при малых интенсивностях инжекции требуется большее время для подъема над уровнем фона, что соответствует более поздней регистрации первого прихода частиц. Тогда иерархия событий по интенсивности инжекции будет 2), 1) и 3), а по ее длительности – 1), 3) и 2). Стрелки на рис. 1б показывают, что возможное время первого прихода протонов в событиях 1) и 3) могло быть таким же ранним, как во 2-ом событии. Тогда их самый ранний выход в МП был на временном интервале  $[0, +4] \pm 1$  мин, до максимума SXR излучения, т.е. в импульсной фазе вспышек по определению [19].

При статистическом анализе КВМ и СКЛ используют средние скорости КВМ, представленные в каталоге LASCO [1, 20], а начало КВМ определяют линейной экстраполяцией измерений С2 и С3 LASCO к поверхности Солнца. Такой подход не учитывает начальное ускорение КВМ [10], которое может быть оценено по наблюдениям на расстояниях  $<2.5R_s$ . Для наших трех событий средние скорости и начальные ускорения близки (табл. 1). При таких величинах ускорения КВМ средние скорости будут достигнуты непосредственно в импульсной фазе, а КВМ успеет пройти путь, равный 0.24 $R_s$ , 0.27Rs и 0.41 $R_s$ .

Совместный анализ нетеплового солнечного излучения, производных температуры (T) - dT/dtи меры эмиссии вспышечной плазмы (ЕМ) – dEM/dt, а также положения KBM на расстояниях  $<2.5R_{\rm s}$  (рис. 2) позволяет выделить фазы преимущественного изменения Т и ЕМ, уточнить начало ускорения КВМ. Отметим, что рост dT/dt соответствует росту  $\mu$ -излучения, а рост dEM/dt – НХR излучения. Два первых перечеркнутых кружка на рис. 2а, 26 соответствуют наблюдениям LASCO C1 в 1-ом событии, согласно [7] ускорение КВМ началось не ранее 11:52:13 UT (+1 мин). Этот момент соответствует росту dEM/dt (рис. 2*a*, 2б), который связан с увеличением плотности плазмы (хромосферное испарение) и объема (рост числа петель) за счет развития КВМ. Во 2-ом событии аналогичный рост *dEM/dt* начался раньше (рис. 2*в*, 2*г*) между 0 и +1 мин. В 3-ем событии сопоставимого роста dEM/dt (рис. 2 $\partial$ , 2e)

не видно, что может быть связано с длительным и меньшим по величине ускорением KBM, между +4 и +6 мин. Возможные разные комбинации слабого и сильного ускорения KBM отмечены в [21–23].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Временные профили потоков релятивистских электронов и протонов >100 МэВ и электронов были подобны на фазе роста и свидетельствовали в пользу их общего механизма ускорения и распространения. Постепенный рост интенсивностей потоков показывал длительную и постепенную инжекцию частиц в МП, которая может являться результатом продолжительного ускорения или захвата. Так как продолжительный захват электронов маловероятен, то, скорее всего, имело место длительное ускорение.

Максимальные интенсивности потоков электронов и протонов в МП в этих событиях не коррелировали с характеристиками KBM, SXR, HXR  $\mu$ -излучения. Таким образом, всплески нетеплового излучения в импульсной фазе и ударная волна KBM имели только косвенное отношение к ускорению солнечных протонов и большинства релятивистских электронов. Вероятно, частицы ускорялись стохастически во множество элементарных актов, чья длительность меньше всего события, до и после ускорения KBM [4, 7, 8]. Протоны СКЛ, находящиеся между областью вспышки и KBM, могли быть источником длительного  $\gamma$ -излучения.

Работа была поддержана субсидиями по темам "Плазма" (АБС и АМС) и "Энерговыделение" (ИЮГ), а также РФФИ (проект № 19-02-00264 (ЮИЛ)).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Klein K.-L., Dalla S. // Space Sci. Rev. 2017. Nos. 3–4. P. 1107.
- Cliver E.W., Kahler S.W., Kazachenko M. et al. // Astrophys. J. 2019. V. 877. Art. No. ID 11.
- Grechnev V.V., Kuzmenko I.V. // Solar Phys. 2020. V. 295. Art. No. ID55.
- Григорьева И.Ю., Струминский А.Б., Шаховская А.Н. // Геомагн. и аэроном. 2020. Т. 60. № 6. С. 710.
- Miller J.A., Cargill P.J., Emslie, A.G. et al. // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. Art. No. 14631.
- Share G.H., Murphy R.J., White S.M. et al. // Astrophys. J. 2018. V. 869. Art. No. ID 182.
- Струминский А.Б., Григорьева И.Ю., Логачев Ю.И. и др. // Физ. плазмы. 2020. Т. 46. № 2. С. 139; Struminskii A.B., Grogor'eva I.Yu., Logachev Yu.I. et al. // Plasma Phys. Rep. V. 46. No. 2. P. 176.
- Струминский А.Б., Григорьева И.Ю., Логачев Ю.И. и др.// Астрофизика. 2020. Т. 63. № 3. С. 437; Stru-

minsky A.B., Grigorieva I.Yu., Logachev Yu.I. et al. // Astrophys. 2020. V. 63. No. 3. P. 388.

- Zhang J., Dere K.P., Howard R.A. et al. // Astrophys. J. 2001. V. 559. P. 452.
- 10. Gopalswamy N., Yashiro S., Thakur N. et al. // Astrophys. J. 2016. V. 833. P. 216.
- 11. *Green L.M., Török T., Vršnak B. et al.* // Space Sci. Rev. 2018. V. 214. P. 46.
- Шарыкин И.Н., Струминский А.Б., Зимовец И.В. // Письма в астрон. журн. 2015. Т. 41. С. 57; Sharykin I.N., Struminsky A.B., Zimovets I.V. // Astron. Lett. 2015. V. 41. P. 53.
- Struminsky A., Gan W. // J. Phys. Conf. Ser. 2015. V. 632. Art. No. 012081.
- Struminskii A.B., Logachev Yu.I., Grogor'eva I.Yu. et al. // Geomagn. Aeronomy. 2020. V. 60. No. 8. P. 1057.
- 15. http://www2.physik.uni-kiel.de/SOHO/phpeph/ EPHIN.htm.

- 16. https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\_list/NOAA/particle.
- 17. Струминский А.Б. // Астрон. журн. 2003. Т. 80. № 11. С. 992; Struminskii A.B. // Astron. Rep. 2003. V. 47. No. 11. P. 916.
- Struminsky A. // Proc. 28-th ICRC. (Tsukuba, 2003). P. 3317.
- 19. Benz A. // Living Rev. Solar Phys. 2017. V. 14. Art. No. ID2.
- 20. *Белов А.В.* // Геомагн. и аэроном. 2017. Т. 57. № 6. С. 783; *Belov A.V.* // Geomagn. Aeronomy. 2017. V. 57. No. 6. P. 727.
- 21. *Gou T., Veronig A.M., Liu R. et al.* // Astrophys. J. 2020. V. 897. Art. No. L36.
- Gopalswamy N., Yashiro S., Mäkelä P. et al. // Astrophys. J. 2018. V. 863. Art. No. L39.
- 23. Veronig A.M., Podladchikova T., Dissauer K. et al. // Astrophys. J. 2018. V. 868. P. 107.

# Solar electrons and protons in flares with pronounced impulsive phase

A. B. Struminsky<sup>a, \*</sup>, I. Yu. Grigorieva<sup>b</sup>, Yu. I. Logachev<sup>c</sup>, A. M. Sadovskii<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Space Research Institute, Moscow, 117997 Russia

<sup>b</sup>Central (Pulkovo) Astronomical Observatory, St.-Petersburg, 196140 Russia <sup>c</sup>Lomonosov Moscow State University, Scobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 111234 Russia \*e-mail: astrum@iki.rssi.ru

Flares with a pronounced impulsive phase were considered, namely X9.7 (S18W63) 11/06/1997, X6.9 (N17W69) 08/09/2011 and X1.1 (S13W59) 07/06/2012, which were accompanied by fast coronal mass ejections and fluxes of relativistic electrons and protons >100 MeV in interplanetary space with similar time profiles. The intensities of electrons and protons did not correlate with the values of acceleration and velocity of coronal mass ejections, maximum fluxes of non-thermal solar radiation. Apparently, the particles were accelerated stochastically in many elementary events, the duration of which was shorter than the flare itself, and were trapped at the shock front. Their fluxes were determined by the conditions of exit into the interplanetary space at the post-eruptive phase.