ДВА ТИПА ДЛИТЕЛЬНЫХ ВСПЫШЕК: СОЛНЕЧНЫЕ ПРОТОНЫ И РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЭЛЕКТРОНЫ

**Струминский А.Б.¹, Логачев Ю.И.²,
Григорьева И.Ю.³, Садовский А.М.¹**

¹Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

²НИИЯФ МГУ им. Д.И. Скобелева, Москва, Россия

³Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

TWO TYPES OF GRADUAL EVENTS: SOLAR PROTONS AND RELATIVISTIC ELECTRONS

**Struminsky A.B.¹, Logachev Yu.I.²,
Grigorieva I.Yu.³, Sadovskii A.M.¹**

¹Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russia

³Central Astronomical Observatory of Russian Academy of Sciences, St.-Petersburg, Russia

Gradual solar flares on April 21, 2002 (X1.5) and August 24, 2002 (X3.1) played an important role in the formation of the modern paradigm of acceleration of solar energetic particles (SEP). According to which, the difference in the observed ionic abundance of SEP was due to acceleration on a quasi-parallel shock wave in the 1st event and on a quasi-perpendicular shock wave in the 2nd event. In our opinion, SEP were accelerated in flares, and it was precisely the properties of flares that differed. In the 1st flare, the peak intensity of radio bursts at 15.4GHz was more than an order of magnitude lower than in the 2nd, i.e. there were no powerful acts of electron acceleration. After it only an increase in the intensity of relativistic electrons and protons with similar time profiles was observed in the interplanetary space. Contrary after the 2nd flare in the interplanetary space firstly was observed an increase of relativistic electrons intensity, and then a simultaneous increase in electrons and protons with similar time profiles. These flares and subsequent events in the interplanetary space do not contradict the scenario of prolonged stochastic acceleration.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-377-380

Длительные солнечные вспышки 21 апреля 2002 г. (X1.5) и 24 августа 2002 г. (X3.1) сыграли важную роль в формировании современной парадигмы ускорения солнечных энергичных частиц [1–2]. В ней ионы ускоряются ударными волнами, а различие в наблюдаемом ионном составе обусловлено ускорением на квазипараллельных (1-ое событие) или на квазиперпендикулярных ударных волнах (2-ое событие) коронального выброса массы (КВМ). По нашему мнению, частицы ускоряются во вспышках, и важны различия именно вспышек, а не ударных волн.

Характеристики рассматриваемых событий представлены в таблице. Данные событий взяты с сайта (<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/events/>), по КВМ (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/). Температура (T) и мера эмиссии (EM) вспышечной плазмы были рассчитаны в пакете *SolarSoft*.

Времена (мин) в таблице даны относительно начала радиоизлучения на 15.4 ГГц в каждом событии. **А** – дата, нулевое время, балл вспышки, **Б** – начало и максимум вспышки в мягком рентгене (SXR, GOES); **В** – время максимума T , время запаздывания максимума EM относительно максимума T ; **Г** – время первого появления KBM (LASCO_C2) и его скорость в км/с; **Д** – наименьшая частота в RSTN регистрируемого радиоизлучения, времена его начала и максимума; **Е** – время и величина максимума излучения на 15.4 ГГц (с.е.п.); **Ж** – время начала радио всплесков III, II и IV типов; **З** – время начала роста сглаженных средних потоков протонов >100 МэВ (GOES), электронов 2.64–6.12 кэВ (SOHO/EPHIN) для первой и второй фазы ускорения [3]. Данные электронных каналов детектора EPHIN/SOHO взяты здесь: <http://www2.physik.uni-kiel.de/SOHO/phpeph/EPHIN.htm>, интегральных протонных каналов GOES взяты тут: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/NOAA/particle/.

Таблица.

А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З
21.04.2002 01:08 X1.5	-25/+47	+25 22	+19 2393	245 +3/+3 +35/+81	+15 1900	+9/+11/+40	+22 нет/+25
24.08.2002 00:53 X3.1	-4/+19	+9 10	+34 1913	245 +8/+9	+7 17000	+7/+16/+22	+22 +5/+28

Под импульсной фазой понимают время наблюдения жесткого рентгеновского (HXR) и микроволнового (μ -) излучения до максимума мягкого рентгеновского (SXR) излучения, затем следуют взрывная фаза и фаза спада [4]. С импульсной фазой принято связывать первую фазу ускорения [3], с взрывной фазой и фазой спада – вторую фазу ускорения. Согласно такому определению в 1-ой вспышке импульсная фаза длилась 47 мин, а во 2-ой – 19 мин, т.е. она включала в себя взрывную фазу, так как по нашим оценкам KBM произошел до начала радио всплеска II-типа, до +10 мин (см. табл.). Отметим, что в этих вспышках SXR-максимум определялся максимумом EM , а не максимумом T (см. рис. 1(А, Б) и табл.).

Рис. 1.

Также на рис. 1(А, Б) хорошо видно, что вспышки различались как максимальными величинами T и EM , так и темпом их роста. В 1-ой вспышке эти параметры были значительно меньше, что, по-видимому, было обусловлено различием нетепловых процессов в предвспышечной и импульсной фазах.

Первая вспышка характеризуется невыраженной импульсной фазой в SXR-излучении. T и EM (см. рис. 1А) медленно и продолжительно росли от начала предвспышечной фазы до максимумов в импульсной фазе. Причем на графике T видны несколько максимумов, вызванные отдельными эпизодами нагрева (ускорения нетепловых электронов). По данным радиоизлучения в обеих вспышках (см. рис. 1В) процессы в импульсной фазе развивались от хромосферы до короны. При сравнимой интенсивности излучения корональной плазмы (245 МГц) максимальная интенсивность μ -излучения (15.4 ГГц) во 2-ой вспышке была на порядок больше, чем в 1-ой. Кроме того, во 2-ой вспышке импульсная фаза была ярко выражена в SXR, что больше соответствует классическим представлениям [4].

В работе [5] рассматривались вспышки со слабой импульсной фазой по данным μ -излучения, но с мощными потоками солнечных протонов в межпланетном пространстве (МП). Яркий их пример – 1-ая вспышка (21 апреля 2002 г.). Такие события не укладываются в общие статистические закономерности связи флюенсов протонов и μ -излучения, найденные в [6], что по мнению автора работы [7] в очередной раз свидетельствует об ускорении протонов на ударных волнах, а не во вспышках. Вторая вспышка соответствует статистическим закономерностям [6].

Согласно [8], выбор того или иного механизма ускорения определяется возможностью ускорять электроны до энергий 10 МэВ, а протонов до >100 МэВ. Механизм ускорения не критичен для первой фазы [3], но его выбор критичен для второй фазы, где ускоряются и релятивистские электроны и протоны. Так как данные по ядерным γ -линиям в этих событиях отсутствуют, то обратимся к наблюдениям солнечных электронов и протонов в МП (см. рис. 2).

Рис. 2.

Событие в МП после 2-ой вспышки выделяется тем, что с +5 по +22 мин наблюдалось только возрастание интенсивности релятивистских электронов, ускоренных в импульсной фазе. Первые электроны 2.64–6.12 МэВ ($\alpha = v/c = 0.99$) были зарегистрированы SOHO/EPHIN на +5 мин. Если они вышли в 0-момент времени, то прошли путь $s = 1.62$ а.е. Если протоны прошли такой же путь, как и электроны, то время их задержки для энергии 100 МэВ ($\alpha = v/c = 0.43$) относительно электромагнитного излучения (ЭМИ) будет ~23 мин. Протоны с энергией 500 МэВ ($\alpha = 0.76$), к которым чувствительны полярные нейтронные мониторы, должны запаздывать относительно ЭМИ на ~9.4 мин. При такой же длине распространения и начале GLE события в 01:17 UT ± 3 мин [2] (т.е., +24 ± 3 мин относительно 0), ожидаемый момент выхода протонов GLE в МП из Солнца будет 01:00UT (+24-9.4 = +15 мин относительно 0-момента времени).

Возрастания интенсивности релятивистских электронов и протонов >100 МэВ имели подобные временные профили и наблюдались в МП примерно с +25 мин в обоих событиях. Это свидетельствует о том, что электроны и протоны ускорялись одним из вариантов стохастического ускорения, а не ударными волнами [8–9]. Отметим, что автор работы [10], уверенный в ускорении протонов на ударных волнах, на этих же основаниях делает вывод о возможности ускорения релятивистских электронов ударными волнами.

Эти наблюдательные факты полностью соответствуют тем, которые рассматривались нами в событиях сентября 2017 года [9] как аргумент в пользу длительного стохастического ускорения протонов и электронов в солнечных вспышках. Состав ионов, ускоренных во 2-ой вспышке [1–2], объясняется быстрым и значительным испарением хромосферного вещества в область ускорения во время импульсной фазы.

Благодарности

Работа АБС и АМС поддержана субсидией по программе «Плазма». ИЮГ – субсидией по программе «Энерговыделение».

Литература

1. Tylka A.J., Cohen C.M.S., Dietrich W.F. et al. // *ApJ*, 2005, v. 625, p. 424.
2. Tylka A.J., Cohen C.M.S., Dietrich W.F. et al. // *ApJ Suppl.*, 2006, v. 164, p. 536.
3. Wild J.P., Smerd S.F., Weiss A.A. // *Ann. Rev., Astron. Astrophys.*, 1963, v. **1**, p. 291.
4. Benz A. // *Living Rev. Solar Phys.*, 2017, v. 14, id. 2 (59 pp).
5. Daibog E.I., Melnikov V.F., Stolpovskii V.G. // *Solar Phys.*, 1993, v. 144, p. 361.
6. Grechnev V.V., Kiselev V.I., Meshalkina N.S., et al. // *Solar Phys.*, 2015, v. 290, p. 2827.
7. Cliver, E.W. // *ApJ*, 2016, v. 832, id:128 (8 pp).
8. Miller J.A., Cargill P.J., Emslie A., et al. // *J. Geophys. Res.*, 1997, v. **102**, p. 14631.
9. Струминский А.Б., Григорьева И.Ю., Логачев Ю.И., и др. // *Физика Плазмы*, 2020, (в печати).
10. Kahler S.W. // *Space Sci. Rev.*, 2007, v. **129**, p. 359.