

УДК 537.591.5

СОЛНЕЧНЫЕ ПРОТОННЫЕ СОБЫТИЯ 6 И 10 СЕНТЯБРЯ 2017 г.: МОМЕНТ ПЕРВОГО ПРИХОДА ПРОТОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ

© 2019 г. А. Б. Струминский*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 15.09.2018 г.

После доработки 06.11.2018 г.

Принята к публикации 28.01.2019 г.

Солнечные протонные события 6 и 10 сентября 2017 г. исследуются методами, разработанными автором ранее. Сравниваются результаты, полученные для событий 27 января и 17 мая 2012 г., 6 и 10 сентября 2017 г. Начало радиоизлучения на 15.4 ГГц в каждом событии принято за ноль времени. Относительно нулевого момента времени рассматриваются временные профили интенсивности протонов GOES, электронов SOHO ERNIN и темпа счета антисовпадательной защиты спектрометра на ИНТЕГРАЛе (ACS SPI). Детектор ACS SPI используется как детектор жесткого рентгеновского излучения, так и релятивистских протонов. В событиях 6 и 10 сентября 2017 г. были зарегистрированы электроны без протонов, ускоренные в импульсной (первой) фазе солнечной вспышки. Также во всех рассмотренных событиях протоны и электроны регистрировались практически одновременно; по всей видимости, они были ускорены во второй фазе солнечных вспышек и позднее.

DOI: 10.1134/S0367676519050351

ВВЕДЕНИЕ

Близится к завершению 24-й цикл солнечной активности, его, по-видимому, последние мощные протонные события произошли 4, 6 и 10 сентября 2017 г. Свои представления о протонных событиях на примере событий сентября 2017 г. уже проверил и подтвердил И. Черток [1]. Наибольший интерес вызвало событие 10 сентября 2017 г., сопровождавшееся наземным возрастанием интенсивности КЛ (GLE); в работах [1–4] получены интересные и противоречащие друг другу результаты. Спор о роли вспышек и корональных выбросов массы в ускорении солнечных протонов продолжается [5].

Цель настоящей работы – проверка идей и соображений автора, которые докладывались на предыдущих Европейских симпозиумах по космическим лучам и Всероссийских конференциях по космическим лучам последние 10 лет [6, 7, 9, 10] на примере событий 6 и 10 сентября 2017 г. Результаты будут сравниваться с результатами для аналогичных событий 26 января и 17 мая 2012 г.

Ускорение протонов на Солнце – не цепочка случайностей, а совокупность закономерностей, которые создают необходимые условия для работы протонного ускорителя на Солнце. В этом случае, если правильно выбрать нулевой момент времени в протонной солнечной вспышке [6], то

ускорение протонов должно начинаться в один и тот же момент развития солнечных вспышек. Возможный выбор нулевого момента был предложен в [6]. Если генерация микроволнового излучения начинается сразу в импульсной фазе вспышки, то нулевой момент времени, найденный способом [6], и начало микроволнового излучения на 15.4 ГГц совпадают. Здесь в качестве нулевого момента выбрано начало микроволнового излучения на 15.4 ГГц в каждом из рассматриваемых событий.

В работе [7] было замечено, что ускорение протонов до релятивистских энергий (генерация пионов) на Солнце происходит через 4–5 мин после нулевого момента времени. Солнечные вспышки с γ -излучением от распада π^0 -мезонов [8] характеризуются большим запаздыванием максимума меры эмиссии мягкого рентгеновского излучения (SXR) относительно максимума температуры вспышечной плазмы, оцененной по данным SXR-детекторов GOES [9].

Детектор ACS SPI регистрирует фотоны с энергией более 150 кэВ. В момент солнечных вспышек с HXR-излучением ACS SPI регистрирует первичные солнечные фотоны. Благодаря вытянутой эллиптической орбите КА и большой массе детектора ACS SPI зачастую оказывается единственным инструментом, зарегистрировавшим солнечное HXR излучение. В данной рабо-

Таблица 1

| Дата, время, балл, координаты | А, мин/мин | Б, мин/мин | В мин, км/с | Г мин СЕП | Д, мин/мин/мин | Е, мин/мин/мин |
|------------------------------------|------------|------------|-------------|-------------|----------------|----------------|
| 27.01.2012 1810 X1.7 N27W71 | -33/+27 | +17/12 | +18, 2508 | +6 300 | нет/ 0/+4 | +20/нет/+25 |
| 17.05.2012 0130 X1.7 N11W76 | -5 /+17 | +10/11 | +18, 1582 | +6 300 | +3/+1/+2 | +10/+20/+22 |
| 06.09.2017 11:54 X9.3 S08W33 | -1/+8 | +3/6 | +30, 1571 | +2 8100 | +3/+8/+7 | +25/нет/+3 |
| 10.09.2017 15:52 X8.2 | -20/+11 | +5/10 | +8, 3163 | +6 21000 | +2/+16/+1 | +25/+14/+3 |

Некоторые характеристики рассматриваемых событий. А – начало и максимум вспышки SXR, GOES; Б – время максимума температуры, время запаздывания максимума меры эмиссии относительно максимума температуры; В – время первого появления СМЕ, его скорость; Г – время и величина максимума излучения на 15.4 ГГц; Д – время начала радио всплесков III, II и IV типов; Е – время начала роста вторичных частиц ACS SPI/GLE/электронов SOHO EPHIN (2.64–6.18 МэВ).

те мы будем использовать данные ACS SPI (<http://isdc.unige.ch/~savchenk/spi-acs-online/spi-acs.pl>) для получения информации о солнечном HXR излучении.

В случае прихода к Земле солнечных космических лучей (СКЛ) ACS SPI регистрирует вторичные фотоны, рожденные солнечными энергичными частицами. В некоторых событиях ACS SPI показывает момент первого прихода протонов на

Землю раньше, чем начало наземного возрастания (GLE) [10]. Это может быть связано как с более ранней регистрацией релятивистских электронов, так и с благоприятным расположением ACS SPI для регистрации анизотропного потока солнечных протонов [10]. Для исследования возможного вклада солнечных электронов в темп счета ACS SPI мы воспользуемся данными эксперимента EPHIN SOHO (<http://www2.physik.uni-kiel.de/SOHO/phperph/EPHIN.htm>) по потокам релятивистских электронов.

Время первого прихода солнечных электронов и протонов на Землю важно для определения момента и места их ускорения на Солнце, соотношение между числом ускоренных протонов и электронов является важной характеристикой солнечного ускорителя [11].

АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЙ

Некоторые характеристики событий, обсуждаемые в работе, приведены в табл. 1. Данные событий взяты с сайта (<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/events/>), по корональным выбросам массы (СМЕ-Coronal Mass Ejection, https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/). Времена в таблице даны относительно выбранного нулевого момента в каждом событии.

На рис. 1 показаны временные профили интенсивности протонов в канале 84–200 МэВ КА GOES (5 мин средние значения – <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/pchan/>) для событий из Таблицы. Мы видим, что солнечные протоны в выбранном канале приходят на Землю через 20–30 мин относительно нулевого момента с учетом возможных оши-

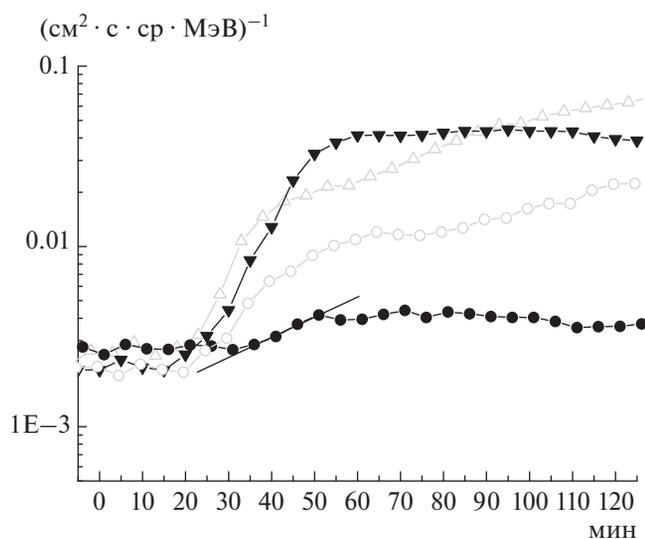


Рис. 1. Поток протонов в канале 84–200 МэВ КА GOES относительно нулевого времени в событиях: 06.09.2017 (черные кружки); 10.09.2017 (черные треугольники); 27.01.2012 (серые кружки); 17.05.2012 (серые треугольники).

бок, что соответствует выходу первых протонов в межпланетное пространство практически в один и тот же момент развития солнечных вспышек.

Для исследования связи между высокоэнергичными процессами в солнечных вспышках и СКЛ вблизи орбиты Земли обратимся к данным ACS SPI (рис. 2). Видно, что интенсивность жесткого рентгена может, как слегка превышать фоновые значения (рис. 2а, события 2012 г.), так и превышать их более чем на порядок (рис. 2б, события 2017 г.). Во всех событиях (рис. 2) есть значимые импульсы HXR в первые три минуты (первая фаза ускорения) и импульсы HXR после третьей минуты (вторая фаза ускорения). Возможные всплески HXR на фазе спада SXR, как это было в событии 26 октября 2003 г. [12], не наблюдались. Явной корреляции между максимальными интенсивностями HXR и потоком солнечных протонов на 1 а. е. нет.

Начало роста ACS SPI за счет вторичных частиц (рис. 2, табл. 1), в трех из четырех рассмотренных событий грубо совпадает с началом протонного возрастания GOES (рис. 1). Выделяется ранний рост счета ACS SPI + 10 мин в событии 17 мая 2012 г. (рис. 2а), который может быть связан с откликом ACS SPI на солнечные электроны или анизотропный поток протонов, незарегистрированный наземными НМ. Отметим, что GLE 17 мая 2012 г. зарегистрировано в 01:50 UT (+20 мин) [13]. В событии 10 сентября 2017 г. (рис. 2б, табл. 1) рост ACS SPI за счет вторичных гамма-квантов наблюдается позднее, чем начало анизотропного GLE в 16:06–16:08 UT [2]. Для исследования возможного вклада солнечных электронов в темп счета ACS SPI мы воспользуемся данными эксперимента EPHIN SOHO.

В событиях 2012 г. (табл. 1) потоки электронов начали рост одновременно или позднее, чем счет ACS SPI от вторичных γ -квантов и потока солнечных протонов GOES (рис. 1). В событиях 6 и 10 сентября 2017 г. (рис. 3) потоки электронов возросли раньше, чем начался рост счета вторичных фотонов ACS SPI, т.е. ACS SPI не реагирует на высокоэнергичные электроны, а регистрирует только вторичные γ -кванты от протонов. Также видно (рис. 3б), что при достаточно высоких потоках первичных солнечных HXR, зарегистрированных ACS SPI, детектор EPHIN SOHO их не путает с электронами. Таким образом, имея на руках данные ACS SPI, SOHO EPHIN и сети нейтронных мониторов (GLE), можно привязать наблюдаемое возрастание интенсивности электронов к первой или второй фазе ускорения солнечной вспышки.

В событиях 2012 г. без выраженной импульсной фазы электронов, ускоренных в ней (первой фазе) было, по всей видимости, недостаточно, чтобы быть зарегистрированными EPHIN. В событии 6 сентября 2017 г. (рис. 3а) мы видим ранний приход электронов из той же популяции,

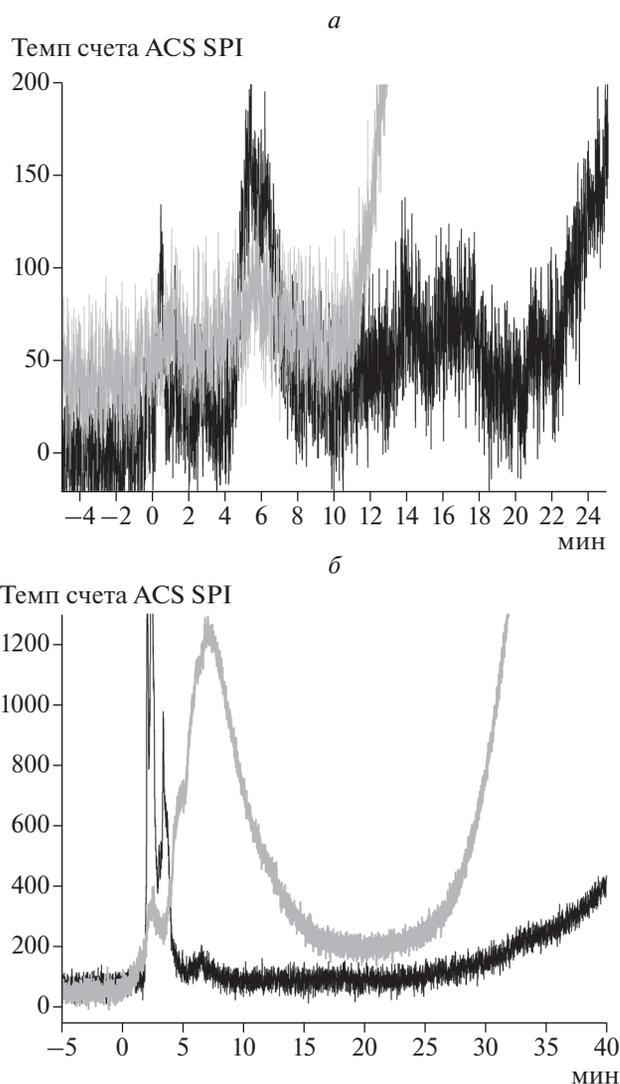


Рис. 2. Сглаженные средние за 1 с темпа счета ACS SPI (фон вычтен) относительно нулевого времени в событиях: (а) 27.01.2012 и 17.05.2012; (б) 06.09.2017 и 10.09.2017. Максимум первичного HXR-излучения 06.09.2017 вне масштаба.

которая генерировала импульсное HXR и микроволновое излучение вспышки. Этот поток электронов не сопровождался солнечными протонами. В событии 10 сентября 2017 г. (рис. 3б), где, как и в событиях 2012 г., нет ярко выраженной импульсной фазы. Мы видим разрыв в данных SOHO EPHIN на 3 мин (рис. 3б), который интерпретируем как приход электронов от первой фазы. Приход электронов от второй фазы совпадает с началом анизотропного GLE [2]. Возможно этот анизотропный поток протонов не виден в данных ACS SPI на фоне солнечного HXR-излучения. Во второй фазе вспышки были ускорены как протоны GLE, так и релятивистские электроны, вышедшие в межпланетное пространство.

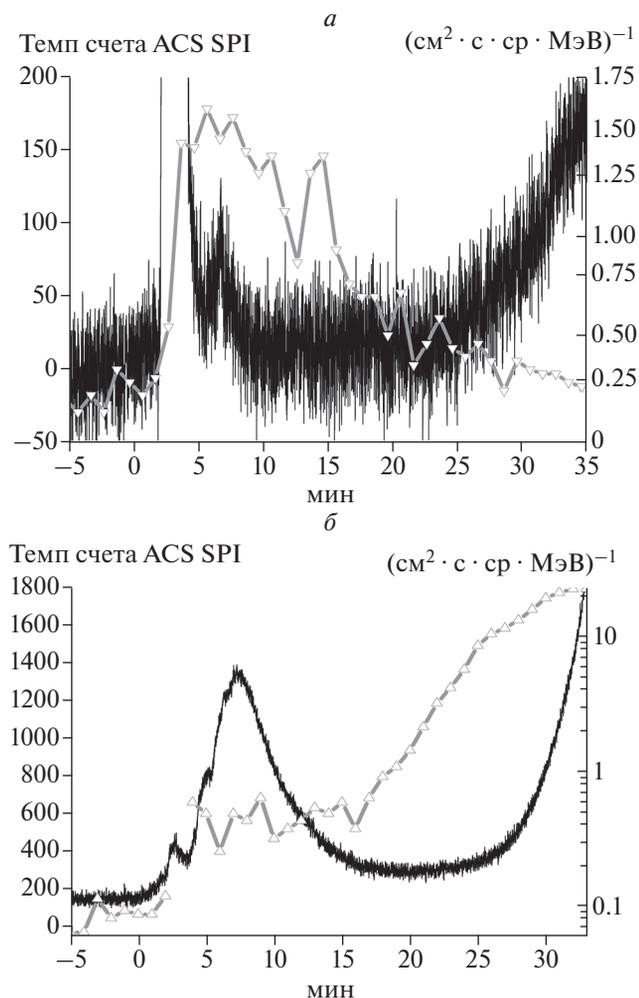


Рис. 3. Поток электронов 2.64–6.18 МэВ в канале E1300 EPHIN SOHO (серые треугольники) и темп счета ACS PI (черная кривая); сглаженные средние за 1 с (фон вычтен) относительно нулевого времени в событиях: а) 06.09.2017 и б) 10.09.2017.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Солнечные протоны >100 МэВ, измеренные протонными детекторами КА GOES, приходят на Землю одновременно относительно нулевого момента с учетом возможных ошибок. Так как ноль времени выбран исходя из свойств солнечных вспышек, то возникающая систематизация временных профилей протонов подчеркивает роль вспышек в их ускорении и выходе в межпланетное пространство.

Вблизи Земли интенсивности протонов могут быть описаны в рамках диффузионной модели распространения с переменной длительной инжекцией в родительских вспышках на долготах E10 – W120 [14, 15]. Функции инжекции протонов для событий 2012 г. были получены в [15]. Очевидно, что изменяя длительность и интенсивность эпизодов инжекции, можно описать временные

профили событий 2017 г. Длительная инжекция с переменной интенсивностью, сопровождающаяся длительным γ -излучением, может быть реализована в качественной модели [16], предполагающей захват протонов.

Две фазы ускорения в солнечных вспышках были впервые предложены на основе радионаблюдений [17], а в [18] приведен первый случай наблюдения двух фаз HXR. Обычно считается, что в первой фазе ускоряются только электроны, а во второй как электроны, так и протоны (ионы). Вторая фаза ускорения связана с наблюдением линии распада π -мезонов [19], что подтверждает взаимодействие протонов в это время. Статистический анализ γ -вспышек RHESSI [20] также свидетельствует о существовании во вспышках двух процессов ускорения, один из которых генерирует пропорциональные числа релятивистских электронов и ионов, а другой преимущественно ускоряет субрелятивистские электроны. Три инжекции электронов в межпланетное пространство найдены в событии 28 октября 2003 г. [21].

Длительное γ -излучение, наблюдающееся после второй фазы вспышек, показывает взаимодействие релятивистских протонов вблизи Солнца. Природа этих протонов остается неизвестной, она может быть связана как с длительным ускорением, так и длительным захватом протонов [16]. Гамма-излучение >100 МэВ регистрировалось Fermi/LAT [21] более 12 часов как в импульсной, так и в длительной фазах события 10 сентября 2017 г. Источник γ -излучения находился более 6 часов в активной области, в которой произошла вспышка. Временные вариации спектра протонов, полученные из данных по γ -излучению, показывают две фазы ускорения протонов [22]. Протоны должны были ускоряться во второй фазе вспышки, а также на фазе спада SXR-излучения. Детектор Fermi/LAT не проводил наблюдения события 6 сентября 2017 г.

В работе [23] однозначно связывается GLE 10 сентября 2017 г. со свойствами CME. Однако каких-либо модельных расчетов для подтверждения этой гипотезы не приводится. На настоящий момент автор не знает ни одной работы, где было бы промоделировано взаимодействие мощного пучка ускоренных частиц с ударным фронтом, чтобы увидеть возможный эффект доускорения.

Аргументом против ускорения протонов ударными волнами являются данные о CME и радиоизлучении, приведенные в табл. 1. Действительно, выбор нулевого времени приводит не только к систематизации временных профилей протонов, но к систематизации времени начала радиоизлучения IV типа (разброс 6 мин). При этом не происходит аналогичной систематизации времен первого появления CME и начала радиоизлучения II типа (разброс 22 и 16 мин), также сильно

различаются скорости СМЕ. Радиоизлучение IV типа происходит при длительном и постепенном росте аркады петель после вспышки, когда происходит дополнительное выделение энергии и ускорение частиц [24].

Работа выполнена за счет субсидий “Плазма-2018”. Автор благодарен участникам космических и наземных экспериментов за возможность использовать их данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chertok I.M.* // Res. Notes Amer. Astron. Soc. 2018. V. 2. P. 20.
2. *Kurt V., Belov A., Kudela K. et al.* // Contrib. Astron. Obs. Skalnat'e Pleso. 2018. V. 35. P. 1.
3. *Gopalswamy N., Yashiro S., Makela P. et al.* // arXiv: 1807.09906. 2018.
4. *Zhao M.-X., Le G.-M., Chi Yu.-T.* // Res. Astron. Astrophys. 2018. V. 18. P. 074.
5. *Мирошниченко Л.И.* // УФН. 2018. Т. 188. № 4. С. 345; *Miroshnichenko L.I.* // Phys. Usp. V. 61. P. 323.
6. *Струминский А.Б.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2011. Т. 75. № 6. С. 751; *Struminsky A.B.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2011. V. 75. № 6. P. 800.
7. *Struminsky A.* // Geomagn. Aeron. 2013. V. 53. № 7. P. 843.
8. *Ackermann M., Ajell M., Albert A. et al.* // Astrophys. J. 2014. V. 787. P. 15.
9. *Struminsky A., Gan W.* // J. Phys. Conf. Ser. 2015. V. 632. Art. no. 012081.
10. *Struminsky A., Zimovets I.* // 21st ECRS. Slovak Acad. Sci. 2009. P. 237.
11. *Ramaty R., Colgate S.A., Dulk G.A. et al.* // Proc. 2nd SKYLAB Workshop on Solar Flares. Ed. P.A. Sturrock. 1978. Chapter 4. P. 117.
12. *Zimovets I., Struminsky A.* // Solar Phys. 2012. V. 281. P. 749.
13. *Li C., Firoz K.A., Sun L.P. et al.* // Astrophys. J. 2013. V. 770. P. 34.
14. *Струминский А.Б.* // Астрон. журн. 2003. Т. 80. № 11. С. 992; *Struminsky A.* // Astron. Rep. 2003. V. 47. № 11. P. 916.
15. *Struminsky A.* // J. Phys. Conf. Ser. 2013. V. 409. Art. no. 012148.
16. *Hudson H.* // in Proc. IAU Symp. 2018. № 335. Eds. Foullon C. & Malandraki O.E. P. 49.
17. *Wild J.P., Smerd S.F., Weiss A.A.* // Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1963. V. 1. P. 291.
18. *Frost K.J., Dennis B.R.* // Astrophys. J. 1971. V. 165. P. 655.
19. *Ramaty R., Murphy R.J., Dermer C. D.* // Astrophys. J. 1987. V. 316. P. L41.
20. *Shih A.Y., Lin R.P., Smith D.M.* // Astrophys. J. 2009. V. 698. P. L152.
21. *Klassen A., Krucker S., Kunow H. et al.* // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. P. A09S04.
22. *Omodei N., Pesce-Rollins M., Longo F. et al.* // arXiv: 1803.07654. 2018.
23. *Gopalswamy N., Yashiro S., Makela P. et al.* // arXiv: 1807.09906. 2018.
24. *White S.M.* // Asian J. Phys. 2007. V. 16. P. 189.