

## СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ И ПРОТОНЫ В СОБЫТИЯХ 4–10 СЕНТЯБРЯ 2017 ГОДА И СОПУТСТВУЮЩИЕ ЯВЛЕНИЯ

© 2020 г. А. Б. Струминский<sup>a, \*</sup>, И. Ю. Григорьева<sup>b</sup>, Ю. И. Логачев<sup>c</sup>, А. М. Садовский<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>b</sup> Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, С.-Петербург, Россия

<sup>c</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 09.07.2019 г.

После доработки 08.09.2019 г.

Принята к публикации 22.09.2019 г.

Солнечные протонные события 4–10 сентября 2017 г. побудили нас обратиться к гипотезе о реализации в солнечных вспышках двух фаз ускорения заряженных частиц, когда в первой фазе ускоряются нерелятивистские электроны, а во второй фазе релятивистские электроны и протоны. В этих событиях по данным SOHO/EPHIN (релятивистские электроны) и ACS SPI (жесткое рентгеновское излучение и протоны >100 МэВ) удалось разделить вблизи Земли популяции электронов и протонов, ускоренные в первой и второй фазах вспышек. Наблюдательные данные свидетельствуют о реализации во вспышках стохастического механизма ускорения, в котором протоны и электроны приобретают энергию во многих элементарных актах, чья длительность много меньше длительности самой вспышки. Для согласования стохастического процесса ускорения и существования двух фаз в солнечных вспышках необходимо учитывать во второй фазе гиротронные потери электронов на излучение, которыми в первой фазе можно пренебречь. Энергия ускоренных протонов в первой фазе мала для их обнаружения на Солнце, но во второй фазе она может достичь величин достаточных для детектирования ядерных гамма-линий и гамма-квантов от распада пионов. В этом случае роль коронального выброса массы заключается: 1) в привлечении во вспышечный процесс все большего числа петель в диапазоне высот от хромосферы до короны; 2) в возвращении ускоренных частиц в область вспышки; 3) в дополнительном ускорении частиц на ударном фронте; и 4) в обеспечении им условий выхода в межпланетное пространство в широком пространственном угле.

**Ключевые слова:** космическая плазма, Солнце, солнечные вспышки, ускорение заряженных частиц, рентгеновское и радиоизлучение, корональный выброс массы, солнечные электронные и протонные события

**DOI:** 10.31857/S0367292120020134

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Сегодня мощные вспышечные события считаются наиболее вероятными кандидатами в источники солнечных протонов и электронов (солнечных космических лучей – СКЛ) в межпланетной среде, а ускорение заряженных частиц – фундаментальным свойством солнечных вспышек (см. обзоры [1–4]). Взаимодействие ускоренных частиц с атмосферой Солнца и его магнитными полями приводит к радио, жесткому рентгеновскому (HXR) и гамма-излучению, которые используются для диагностики солнечных вспышек (см. рис. 1 в [5]).

Начиная с работ [6, 7], появляется все больше свидетельств того, что собственно вспышку можно разделить, по крайней мере, на две фазы, в которых, по-видимому, работают разные механизмы ускорения. В “первой” фазе ускоряются пре-

имущественно электроны, а во “второй” – преобладают протоны [8–13]. Соотношение между числом ускоренных протонов и электронов является важной характеристикой солнечных ускорителей. Классификация вспышек в эпоху SMM (Solar Maximum Mission) представлена, например, в обзоре [14], процессы в импульсной, “первой”, фазе обсуждаются в работе [15], а в постепенной, “второй”, фазе рассмотрены в [16].

Ускорение в солнечных вспышках может продолжаться от долей секунды, до нескольких часов, при этом нетепловое излучение регистрируется не только в импульсной фазе. Новый тип нетеплового коронального источника, излучающего в жестком рентгене с энергиями >10 кэВ, обнаружен до импульсной фазы по наблюдениям RHESSI [17]. Возможность ускорения электронов на поздней стадии спада мягкого рентгеновского

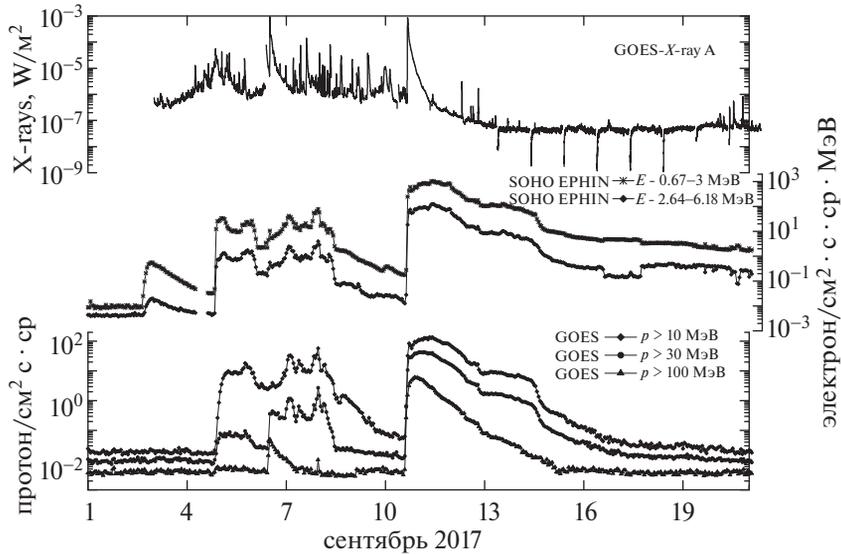


Рис. 1. Вспышки в сентябре 2017 г. по измерениям GOES и SOHO.

(SXR) излучения была впервые показана по радиоизлучению [18]; по HXR- и радиоизлучению [19]. Наблюдения космической обсерватории Fermi/LAT показали, что длительное солнечное гамма-излучение  $>100$  МэВ, свидетельствующее о взаимодействии в атмосфере Солнца протонов с энергией  $>400$  МэВ, является достаточно частым явлением [12, 20–22].

В межпланетной среде наблюдаются, как электронные (импульсные), так и протонные (постепенные) события [23–27]. Эти события можно рассматривать как некоторые эталонные, элементарные события. Наиболее часто встречающиеся, смешанные события можно представить как совокупность таких элементарных событий. Согласно статистическому исследованию [25] четкой границы между импульсными и постепенными событиями нет.

Считается, что источником электронных событий является импульсная (“первая”) фаза вспышки, а протонных – постепенная (“вторая”) фаза. Механизм ускорения, работающий во “второй” фазе, может быть связан как с ускорением на ударных волнах корональных выбросов массы (КВМ), так с системой послевспышечных петель (постэруптивное ускорение). Идея постэруптивного ускорения была предложена в работе [28], где был сделан вывод, что электроны “второй” фазы не могут быть ускорены ударной волной. При этом ударная волна рассматривается как основной источник солнечных протонов, т.е. как ускоритель частиц, место и средство их выхода в межпланетное пространство [29]. Спор о роли вспышек и ударных волн КВМ продолжается (см. [26, 30–35]).

В радиоастрономии дискуссия о происхождении СКЛ зачастую сводится к вопросу о том, что лучше коррелирует с событиями СКЛ – радиоизлучение II или III типа (см., например, [32]). Быстро дрейфующий по частоте радиовсплеск III типа, генерирующийся на гармониках плазменной частоты при распространении в плазме пучка электронов, ускоренных во вспышке, является указанием на их выход в межпланетное пространство [36–38]. Источником медленно дрейфующего по частоте радиовсплеска II типа является плазма вблизи ударной волны, распространяющейся в короне. Гармоники плазменной частоты возбуждаются ускоренными электронами, захваченными вблизи фронта ударной волны. Радиоизлучение IV типа также хорошо коррелирует с событиями СКЛ [39] и, по-видимому, вызвано электронами, ускоряющимися вблизи вершин постэруптивной петельной аркады [28].

Время первого прихода солнечных электронов и протонов на Землю важно для определения момента и места их ускорения. Однако совместный анализ данных по протонам и электронам проводился в достаточно редких работах (например, [23, 40–43]).

Статистическое исследование [41] – первая попытка сравнения времен инжекции 2 ГэВ протонов, 1 МэВ и 100 кэВ электронов в межпланетное пространство по данным вблизи Земли. Оказалось, что наиболее вероятное время инжекции протонов совпадает с максимумом первого значимого пика микроволнового излучения, время инжекции электронов с энергией 1 МэВ – запаздывает на 5 мин, а 100 кэВ – опережает его на 5 мин. Авторы работы [42] считают своим главным результатом тот факт, что нерелятивистские

электроны и высокоэнергичные протоны выходят в межпланетное пространство в одно время в пределах 8 мин. Статистические исследования не позволяют разделить первую и вторую фазы. Отметим, что точность оценки времени выхода частиц в межпланетное пространство по наблюдениям на 1 а.е. составляет около 10 мин [44].

При наблюдении СКЛ на близких от Солнца расстояниях, можно улучшить оценки времени выхода частиц. Приближение к источнику было одной из задач КА HELIOS-2. Согласно наблюдениям HELIOS-2 в некоторых редких событиях вблизи Солнца удалось разделить электроны, ускоренные в “первой” фазе, от электронов и протонов, ускоренных во “второй” [23]. Отметим, что в событии 28 октября 2003 г. было три разнесенных во времени инжекции электронов в межпланетное пространство [40].

В сентябре 2017 г. в конце 24 солнечного цикла произошла серия мощных солнечных вспышек, сопровождавшихся солнечными протонными событиями (рис. 1), которые наблюдались широким набором наземных и космических инструментов. Качественный анализ радиоизлучения исследуемых вспышек сентября 2017 г. по методике ИЗМИРАН приведен в работе [45], где было в очередной раз показано, что данные по микроволновому излучению могут быть использованы для оценки свойств потока солнечных протонов. Это указывает на то, что протоны, распространяющиеся в межпланетном пространстве, и электроны, генерирующие микроволновое излучение, имеют вспышечную природу [31]. Обзор наблюдений СКЛ в этих событиях на космических аппаратах представлен в работе [46]. Наибольший интерес вызвала вспышка X8.2 10 сентября 2017 г. и связанное с ней протонное событие, сопровождавшееся наземным возрастанием (GLE) интенсивности космических лучей (см., например, [21, 47–51]). В частности, было показано, что в межпланетном пространстве удается разделить электроны, ускоренные в “первой” и “второй” фазах вспышек M5.5 4-го, X2.2 и X9.3 6-го и X8.2 10 сентября 2017 г. [52–54]. Авторы этих работ обратили внимание на практически синхронный приход электронов “второй” фазы и протонов. По нашему мнению, во всех процитированных работах были получены достаточно противоречивые результаты и вопрос о механизмах ускорения в этих вспышках остается открытым.

Настоящая статья посвящена анализу наблюдений вблизи Земли электронов и протонов, физических условий в первой и второй фазах по наблюдениям на Солнце событий M5.5 4-го, X2.2 и X9.3 6-го и X8.2 10 сентября 2017 г. В разд. 2 описаны инструменты и методы, обосновывается новизна предлагаемых подходов. В разд. 3 рассмотрены наблюдения явлений на Солнце и СКЛ

вблизи Земли. В разд. 4 обсуждается возможный сценарий ускорения электронов и протонов в солнечных вспышках. В разд. 5 сформулированы выводы.

## 2. ИНСТРУМЕНТЫ И МЕТОДЫ

Обычно сравнивают потоки электронов и протонов с энергией до десятков МэВ, распространяющиеся в межпланетной среде, когда электроны уже релятивистские, а протоны — еще нет. В частности, в работе [43] выполнен тщательный анализ времени прихода электронов и протонов (до 30–50 МэВ) в солнечных протонных событиях и показано систематическое опережение прихода электронов. Здесь мы предлагаем сравнивать именно потоки релятивистских протонов и электронов для исследования свойств популяций частиц, ускоренных в “первой” и “второй” фазах солнечных вспышек. Так как фазы (механизмы ускорения) различаются наличием или отсутствием как раз релятивистских электронов, то за ноль времени в каждом рассматриваемом событии мы принимаем начало регистрации радиоизлучения на частоте 15.4 ГГц, которое генерируется релятивистскими электронами в магнитном поле Солнца.

Выбранный ноль времени можно рассматривать как момент появления релятивистских электронов в атмосфере Солнца и как условную границу между первой и второй фазами. Вероятно, что время инжекции протонов с энергиями в несколько ГэВ соответствует времени первого значимого пика микроволнового излучения [41]. Мы считаем, что “первая” фаза вспышки реализуется всегда, если на Солнце зарегистрировано нетепловое электромагнитное излучение, а “вторая” — реализуется только в том случае, если на Солнце регистрировались ядерные гамма-линии или в межпланетном пространстве наблюдались ускоренные протоны. Введение нулевого времени позволяет нам сравнивать в одной временной шкале различные события.

Антисовпадательная защита спектрометра на КА ИНТЕГРАЛ (ACS SPI) регистрирует протоны с энергией более 100 МэВ и фотоны с энергией более 150 кэВ. Это интегральный и некалиброванный детектор, который обладает большой площадью ( $3000 \text{ см}^2$ ) и высокой временной разрешающей способностью (50 мс). Данные ACS SPI находятся в свободном доступе на сайте (<http://isdc.unige.ch/~savchenk/spi-acs-online/spi-acs.pl>).

В спокойные периоды (вне радиационных поясов, и когда нет солнечных вспышек и СКЛ) фоновый счет ACS SPI определяется интегральным потоком космических лучей  $>100 \text{ МэВ}$   $0.1 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$  и составляет около 5000 им-

пульсов за 50 мс. Таким образом, имеется постоянный маркер, позволяющий определять дополнительные потоки протонов и фотонов над фоновым счетом прибора с высокой статистической точностью. При усреднении за 1 с (20 точек) статистическая точность фона составляет 316 имп/с или 0.32%, а при одноминутном усреднении (1200 точек) – 2449 имп/мин или 0.04%. На всех графиках с темпом счета ACS SPI приведены значения за 50 мс с вычтенным фоном, как сглаженные скользящим средним за 1 с (20 точек), так и за 1 мин (1200 точек). При сглаживании данных ACS SPI за 1 мин значимыми становятся возрастания над фоном более 2 отсчетов за 50 мс, которые соответствуют интегральному потоку протонов  $>100 \text{ МэВ } 4 \times 10^{-5} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ . Для сравнения, фоновый счет типичного нейтронного монитора (НМ) составляет 5000 имп/мин, его статистическая точность 70 имп/мин или 1.4%.

Во время мощных 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. Применение данных ACS SPI для исследования солнечных вспышек обсуждается в работе [56]. В данной работе для получения информации о солнечном HXR-излучении мы будем использовать, как данные ACS SPI так и данные RHESSI [55].

В некоторых событиях ACS SPI оказывается более чувствительным детектором протонов, чем обычные НМ [57]. Здесь мы используем ACS SPI, также и как некалиброванный детектор релятивистских протонов. Представление о минимальных потоках протонов, регистрируемых ACS SPI над фоном, дает следующая оценка. При фоне

равном  $10^5 \pm 300 \text{ с}^{-1}$  и геометрическом факторе  $\Gamma = 3000 \text{ см}^2 \cdot 4\pi \text{ ср} \approx 3.7 \times 10^4 \text{ см}^2 \cdot \text{ср}$ , получим для фона  $3 \pm 0.01 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$  ( $\sigma = 0.01 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ ). Будем считать, что эффект измерен надежно, если он превышает  $3\sigma$ , т.е.  $3 \times 10^{-2} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$  или  $4 \times 10^{-5} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{МэВ}^{-1}$ , если нормировать на ширину протонного канала GOES 110–900 МэВ. В настоящий момент стандартных протонных детекторов с такой чувствительностью на орбите Земли нет.

Для рассмотренных событий, времена регистрации радио и мягкого рентгеновского излучения взяты из открытого доступа (RSTN: <ftp.ngdc.noaa.gov/STP/space-weather/solar-data/solar-features/solar-radio/> и GOES: <satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/> соответственно). Информация по KBM взята из каталога SOHO LASCO CME CATALOG ([cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/) [58]). Также, мы использовали сводные отчеты о солнечной активности, составленные американским Центром предсказания космической погоды (the Space Weather Prediction Center – SWPC, <ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/events/>).

### 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Некоторые характеристики рассматриваемых событий, отнесенные к выбранному нами “нулевому” времени, представлены в табл. 1. Пересчитанные времена (в минутах) в табл. 1 приведены относительно начала радиоизлучения на 15.4 ГГц в каждом событии (кроме интервала между максимумами температуры и меры эмиссии).

**Таблица 1.** Характеристики рассматриваемых событий относительно нуля времени. Времена даны относительно начала радиоизлучения на 15.4 ГГц в каждом событии в минутах: **А** – дата, нулевое время, балл вспышки, **Б** – начало и максимум вспышки мягкого рентгеновского излучения (SXR) по GOES; **В** – время максимума температуры, время запаздывания максимума меры эмиссии (относительно максимума температуры); **Г** – время первого появления KBM (LASCO C2) и его скорость в км/с; **Д** – наименьшая частота, регистрируемого RSTN-излучения, времена его начала и максимума; **Е** – время и величина максимума излучения на 15.4 ГГц (СЕР); **Ж** – время начала радиовсплесков III, II и IV типов; **З** – время начала роста вторичных частиц ACS SPI, электронов SOHO EPNIN 2.64–6.12 кэВ от первой и второй фазы вспышки

А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З
04.09.2017, 20:43, M5.5	–15/–10	–11/2	–7 1418	410 –14/+6	+6 360	?/–1/–95	+25/нет/+15
06.09.2017, 09:00, X2.2	–3/+10	+9/2	нет	1415 +3/+28	+9 1400	?/?/?	нет/+6/нет
06.09.2017, 11:54, X9.3	–1/+8	+3/6	+30 1571	245 +8/+9	+2 8100	+3/+8/+7	+22/+3/+35
10.09.2017, 15:52, X8.2	–20/+11	+5/10	+8 3163	245 +1/+6	+6 21000	+2/+16/+1	+23/+3/+16

### 3.1. Вспышка X8.2 и связанные с ней явления 10 сентября 2017 г.

В списке событий (SWPC-отчет), сопровождавших вспышку X8.2, первым упомянуто начало SXR-излучения в 15:35 UT (–17 мин по нашей шкале). Далее, в 15:50 UT (–2 мин) стоит момент регистрации начала радиоизлучения на 1415 и 2695 МГц, связанных с областью средней хромосферы (RSTN, Sagamore Hill). Данные RHESSI HXR-излучения доступны только, начиная с ~15:52 UT. Интересно понять, чем была вызвана столь длительная предвспышечная стадия, сопровождающаяся плавным ростом SXR-излучения по данным GOES (см. штриховую кривую на рис. 2а).

Возможное объяснение дают наблюдения радиоизлучения на другой RSTN станции (San-Vito, см. рис. 2а), показавшие начало всплеска на 245 МГц (толстая черная кривая) примерно в 15:38 UT (–14 мин), тогда как в это время на более высоких частотах (2695 МГц и 15.4 ГГц, серая и светло-серая кривые соответственно) роста излучения не наблюдалось. В таком случае можно предположить, что ускорение электронов с мягким спектром в предвспышечной фазе происходило в короне примерно с –14 до –5 мин (рис. 2а).

События с –14 до +1 мин развивались из короны в хромосферу и обратно, что подтверждается регистрацией излучения на 245 МГц (RSTN, Sagamore Hill в 15:53 UT, +1 мин). Этот момент совпал с началом развития радиоизлучения IV типа (SWPC-отчет). Согласно работе [47] всплеск II типа в метровом диапазоне наблюдался с 15:53 UT и был наложен на всплески III типа (15:54 UT (+2 мин)–16:04 UT (+12 мин)) и излучение IV типа. Наибольшее время запаздывания максимума меры эмиссии относительно максимума температуры и достаточно длительное достижение максимума излучения на 15.4 ГГц (табл. 1) свидетельствуют о постепенном развитии вспышки в большом диапазоне высот в атмосфере Солнца. Высокоэнергичные электроны взаимодействовали во всем вспышечном объеме по наблюдениям EOSVA и RHESSI [48]. По результатам наблюдений авторы статьи считают, что источниками микроволнового и HXR-излучения были одни и те же нетепловые электроны.

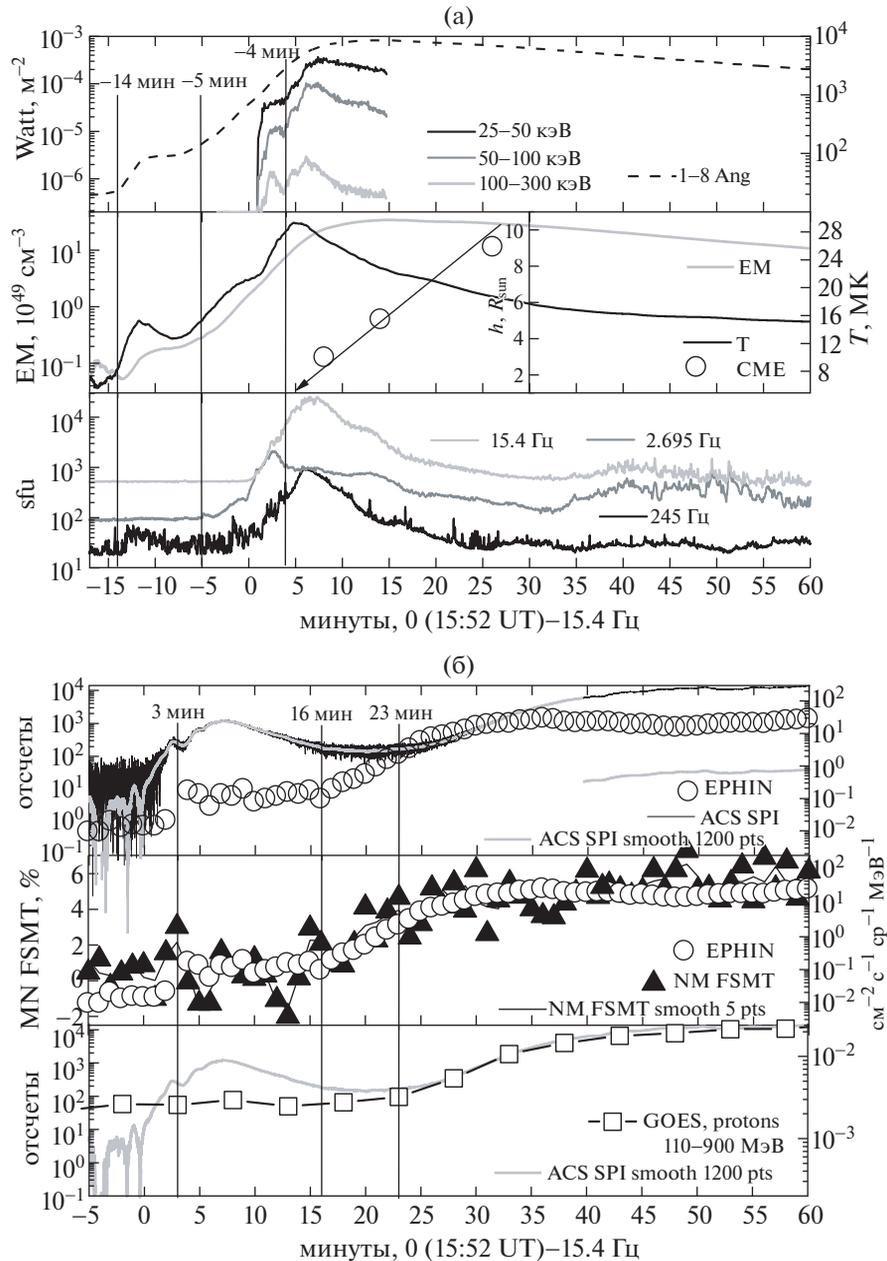
Авторы [47] считают, что КВМ образовался в 15:53 UT (+1 мин) и двигался с ускорением до своего первого появления в поле зрения коронографа LASCO. Если это так, то импульсной фазы в этом событии в общепринятом понимании не было, а начиная с +1 мин была постэруптивная фаза. Линейная экстраполяция данных показывает, что на одном солнечном радиусе КВМ должен был быть примерно в +5 мин.

На графиках интенсивности микроволнового и HXR-излучения (рис. 2а) выделяется эпизод

между 0 и +4 мин с жестким спектром (hard по терминологии [59]), который можно считать “первой” фазой вспышки. “Вторая” началась не позднее +4 мин, когда было зарегистрировано гамма-излучение >100 МэВ. Первые солнечные гамма-кванты >100 МэВ были обнаружены 15:56 UT (+4 мин), максимум их интенсивности был 15:59 UT (+7 мин), и оставались выше фоновых значений вплоть до 05:11 UT 11 сентября [21]. Также, при сравнении данных RHESSI в различных каналах (рис. 2а) видно, что спектральная динамика HXR-излучения была типичной для события, сопровождающегося солнечными протонами в межпланетном пространстве, т.е. выполнялся закон Киплингера “soft-hard-harder” [59]. Подчеркнем здесь аналогию между временными профилями нетеплового излучения родительских вспышек наиболее мощных протонных событий 23 и 24 цикла солнечной активности, а именно всплеск X17 7 сентября 2005 г. [60, 61] и X8.2 10 сентября 2017 г. Каждый эпизод Киплингера “soft-hard-harder” был источником электронов, наблюдавшихся детектором EPHIN SOHO вблизи Земли (см. верхняя и нижняя панели, рис. 2б) примерно с +3 мин. Только электроны на орбите Земли наблюдались вплоть до начала GLE (около 15–16 мин) (рис. 2б).

Данные, представленные на средней панели рис. 2б показывают, что начало анизотропного GLE +16 мин [50], которое вызвано приходом на Землю релятивистских протонов, соответствует времени прихода релятивистских электронов. Потоки релятивистских протонов и электронов показали подобные временные профили, т.е. они были ускорены и распространялись одинаковым образом [54]. Ускорение протонов до релятивистских энергий в эпизоде вспышки “harder” (после +4 мин) согласуется с наблюдением гамма-излучения детектором Fermi/LAT [21]. Протоны меньших энергий, которые могли бы ускориться до эпизода “harder”, должны прийти на Землю позднее релятивистских протонов.

Момент прихода первых электронов в канале 2.64–6.18 МэВ отмечен на рис. 2б (+3 мин), т.е. если электроны были инжектированы в межпланетное пространство в нулевой момент, то длина пройденного ими пути 1.4 а.е. Протоны с энергиями порядка 500 МэВ пройдут этот путь с запаздыванием на 6 мин относительно электромагнитного излучения, т.е. если они вышли на +4 мин (момент появления пионного гамма-излучения [21], рис. 2а), то время их прихода будет +10 мин, что представляется вполне приемлемой точностью при начале GLE HM Fort Smith +16 мин. Более позднее “протонное” возрастание по данным ACS SPI связано с высоким фоном рентгеновского излучения (верхняя и нижняя панели рис. 2б). Сравнение временных профилей, приведенных на рис. 2б, показывает что детектор ACS SPI меж-



**Рис. 2.** Вспышка X8.2 10 сентября 2017 г. (а) Наблюдения Солнца: (сверху вниз) поток SXR (GOES, 1–8 Å, штриховая кривая) и темп счета HXR-детектора RHESSI (черная кривая – канал 25–50 кэВ, серая кривая – 50–100 кэВ; светло-серая кривая – 100–300 кэВ); температура (черная кривая) и мера эмиссии (светло-серая кривая) вспышечной плазмы по данным GOES, положение KBM по данным SOHO LASCO C2 и C3 (открытые кружки, черная длинная стрелка – аппроксимация на один солнечный радиус); поток радиоизлучения (RSTN: светло-серая кривая – 15.4 ГГц, серая кривая – 2695 МГц и черная кривая – 245 МГц). (б) Наблюдения частиц вблизи Земли: (сверху вниз) темп счета ACS SPI за 50 мс (вычтен фон 5350 отсчетов) сглаженный за 1 с (20 точек) – черная кривая и за 1 мин (1200 точек) – серая кривая; поток электронов SOHO EPHIN в канале 2.64–6.18 МэВ – (1 мин данные – открытые кружки) и GLE %, зарегистрированное NM Fort Smith; темп счета ACS SPI за 50 мс (вычтен фон 5350 отсчетов) сглаженный за 1 мин (1200 точек) – серая кривая и поток протонов в канале 110–900 МэВ GOES.

ду +16 и +23 мин регистрировал, как HXR-излучение, так и релятивистские протоны, между +23 и +33 мин релятивистские протоны, а после +33 мин преимущественно протоны с энергией более 100 МэВ.

Грубая калибровка ACS SPI по данным GOES в протонном канале 110–900 МэВ проведена на нижней панели рис. 2б, фон GOES составлял  $3 \times 10^{-3} (\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{МэВ})^{-1}$  соответствует примерно 100 отсчетам. Таким образом использование

данных ACS SPI с 1 мин сглаживанием в принципе позволяет видеть потоки протонов  $3 \times 10^{-5} (\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{МэВ})^{-1}$ , если нет высокого рентгеновского фона. В случае событий 4 и 6 сентября 2017 г. рентгеновский фон перед началом протонного возрастания составлял 20–30 отсчетов, т.е. значимыми могли быть потоки  $(0.6-1) \times 10^{-3} (\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{МэВ})^{-1}$ , что в 3–5 раз меньше фона GOES.

Во вспышке X8.2 10 сентября 2017 г. реализовались как “первая”, так и “вторая” фазы, причем “первая” была слабее “второй” по своим проявлениям в нетепловом излучении на Солнце и в частицах СКЛ в межпланетном пространстве.

### 3.2. Вспышка X2.2 и связанные с ней явления 6 сентября 2017 г.

Вспышка X2.2 началась в 08:57 UT (на –3 мин). Этому предшествовало начало оптической вспышки 2В в 08:52 UT (на –8 мин) и рост в канале RHESSI 25–50 кэВ (рис. 3а). По-видимому, нетепловые электроны с энергией <50 кэВ ускорились достаточно глубоко в хромосфере, так как радиоизлучение не наблюдалось вплоть до 09:00 UT (SWPC). Далее, сначала стала расти интенсивность на 15.4 ГГц, а затем последовательно стали регистрироваться более низкие частоты. Самая низкая частота, зарегистрированная в интересующий нас промежуток времени, была 1415 МГц (SWPC), следовательно область взаимодействия ускоренных электронов не выходила за пределы хромосферы. Поэтому можно предположить, что сама вспышка X2.2 6 сентября 2017 г. — чисто хромосферное явление, которое не сопровождалось КВМ, и в котором не регистрировалось радиоизлучение II–IV типов.

Отметим, что было два эпизода ускорения электронов до релятивистских энергий, так как наблюдались два всплеска микроволнового и НХР-излучения примерно на +4 и +9 мин (рис. 3). Именно с наличием второго эпизода ускорения связано позднее достижение максимума излучения на 15.4 ГГц (табл. 1). Малое время запаздывания максимума меры эмиссии относительно максимума температуры свидетельствует об импульсном характере, по крайней мере, второго НХР-всплеска (табл. 1).

У нас нет информации о взаимодействии ускоренных протонов с веществом в атмосфере Солнца во время этих двух эпизодов, но нельзя исключить, что протоны с энергиями ниже порога взаимодействия <10 МэВ — “молчащие” протоны — все же присутствовали.

Детектор SOHO EPHIN зарегистрировал явное превышение над фоновыми значениями в электронных каналах (рис. 3б). При этом, протонные детекторы не показали возрастания над текущим уровнем фона вплоть до протонного со-

бытия, связанного уже со вспышкой X9.3 6 сентября 2017 г.

Вспышка X2.2 6 сентября 2017 г. была источником только релятивистских электронов в межпланетной среде, следовательно, в ней была реализована только “первая” фаза вспышки, она развивалась в хромосфере и фотосфере.

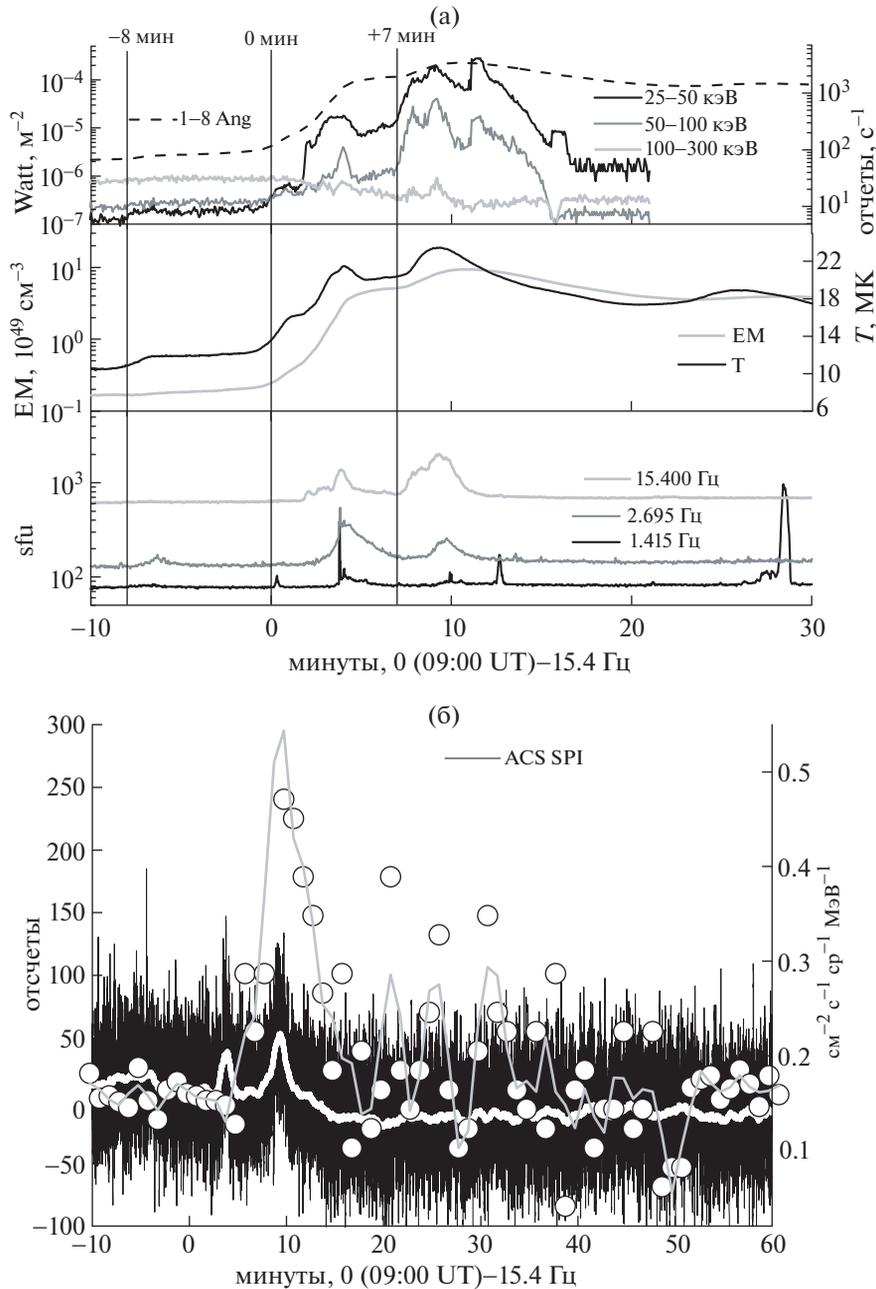
### 3.3. Вспышка X9.3 и связанные с ней явления 6 сентября 2017 г.

Вспышка X9.3 6 сентября 2017 г. началась в 11:53 UT (–1 мин) на фоне предыдущей вспышки X2.2 (см. штриховую кривую до нуля времени на рис. 4а). Предвспышечная стадия, по всей видимости, отсутствовала, так как нет указаний на ее существование в радио и НХР-излучении (RHESSI находился на ночной стороне орбиты все время развития вспышки). Возрастание темпа счета ACS SPI от первичного солнечного НХР-излучения >150 кэВ началось на 2 мин позже нуля времени (см. рис. 4б). В этой связи можно заключить, что нагрев хромосферы происходил за счет электронов с более мягким спектром первые три минуты развития события (рис. 4).

Наблюдавшиеся всплески микроволнового и НХР-излучения — классический пример импульсной фазы вспышки (рис. 4). Малое время запаздывания максимума меры эмиссии относительно максимума температуры и быстрое достижение максимума излучения на 15.4 ГГц (табл. 1) подтверждают это. Гамма-линии, регистрируемые KONUS, которые образуются при взаимодействии протонов с энергией >30 МэВ, наблюдались от +2 мин (11:56 UT) до +5 мин (11:59 UT) [62]. Радиовсплеск III типа регистрировался от 11:57 до 12:02 UT (+3–+8 мин). Таким образом, “вторая” фаза в этой вспышке началась с +2 мин и длилась более часа, проявляясь относительно слабыми потоками радиоизлучения, а классическая импульсная фаза, включала в себя как “первую”, так и “вторую” фазы.

Только после 5–6 мин (в нашей шкале времени) область взаимодействия вспышечных электронов переместилась в корону (см. SWPC-отчет и начало излучения на 245 МГц на рис. 4а). Радиоизлучение II и IV типов началось, соответственно, на +8 и +7 мин, т.е. КВМ мог произойти между +5 и +8 мин, что не противоречит аппроксимации его положения по данным LASCO.

Детектор SOHO EPHIN зарегистрировал чисто электронное событие начиная с 3 мин (нижняя панель, рис. 4б) и до начала протонного события на орбите Земли. Начало протонного события соответствует +22 мин (сглаженные средние темпа счета ACS SPI за 1 мин) и +35 мин (сглаженные средние за 1 с), как видно на верхней панели рис. 4б и в табл. 1).

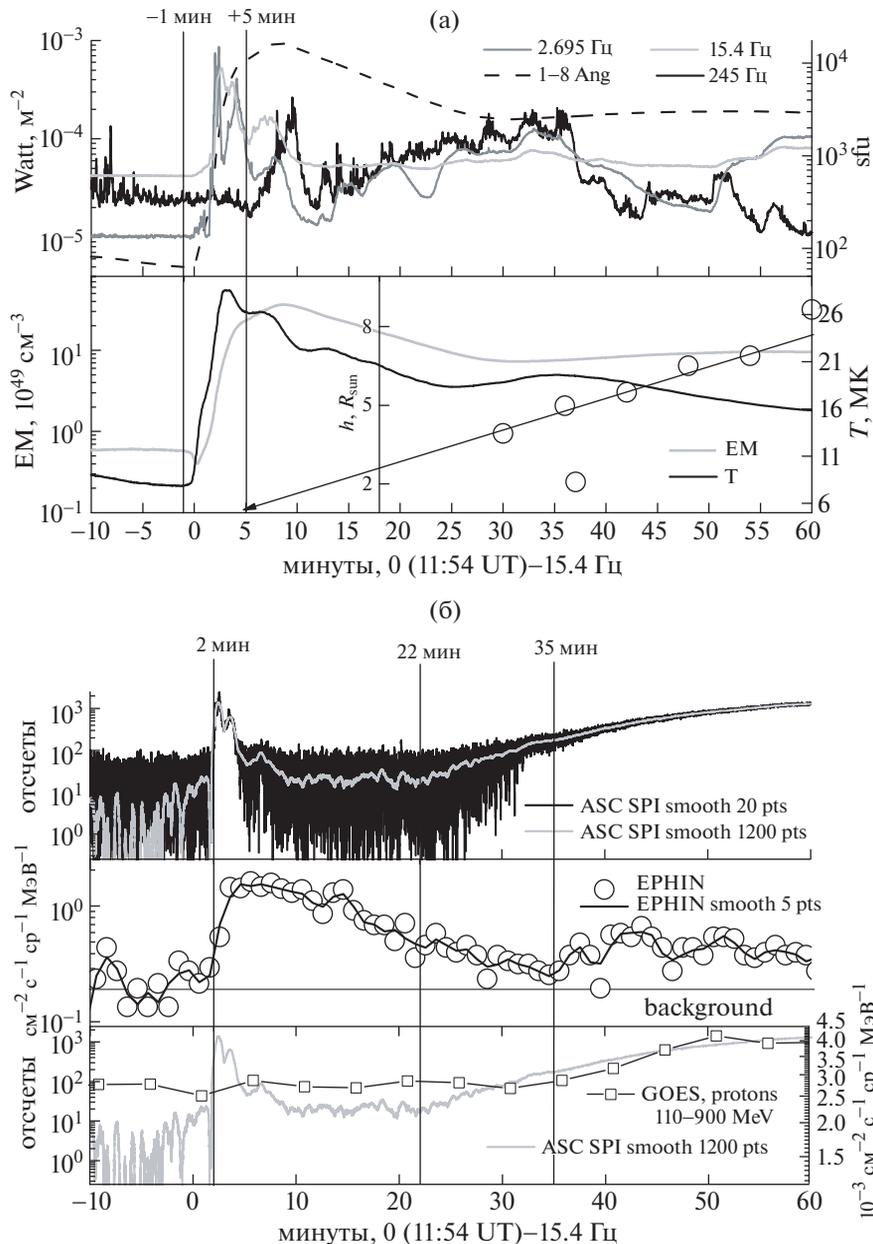


**Рис. 3.** Вспышка X2.2 6 сентября 2017 г. (а) Наблюдения Солнца: (сверху вниз) поток SXR (GOES, 1–8 Å, штриховая кривая) и темп счета HXR-детектора RHESSI (черная кривая – канал 25–50 кэВ, серая кривая – 50–100 кэВ; светло-серая кривая – 100–300 кэВ); температура (черная кривая) и мера эмиссии (светло-серая кривая) вспышечной плазмы по данным GOES; поток радиоизлучения (RSTN): светло-серая кривая – 15.4 ГГц, серая кривая – 2695 МГц и черная кривая – 1415 МГц. (б) Наблюдения частиц вблизи Земли: (сверху вниз) темп счета ACS SPI за 50 мс (вычтен фон 5970 отсчетов) сглаженный за 1 с (20 точек) – черная кривая и за 1 мин (1200 точек) – белая кривая; поток электронов SOHO ERNIN в канале 2.64–6.18 МэВ – (1 мин данные – открытые кружки, сглаженные за 5 мин – серая кривая).

В данном случае, повторяя наши рассуждения выше в разделе 3.1, длина пройденного электронами пути составляет не менее 1.4 а.е. Протоны с энергиями 100 и 500 МэВ пройдут этот путь за 26 и 14 мин соответственно, т.е. время их запаздывания относительно фотонов 18 и 6 мин. Возрастание протонов 100 (500 МэВ) могло начаться не

раньше +20 мин (+8 мин). Как видно на нижней панели на рис. 4б такой ранний приход протонов мог быть скрыт под фоном детекторов.

Во время протонного события детектор SOHO ERNIN регистрировал потоки электронов, превышающие фоновые (средняя панель, рис. 4б). Позднее время начала электронного возрастания



**Рис. 4.** Вспышка X9.3 6 сентября 2017 г. (а) Наблюдения Солнца: (сверху вниз) поток SXR (GOES, 1–8 Å, штриховая кривая) и поток радиоизлучения (RSTN: светло-серая кривая – 15.4 ГГц, серая кривая – 2695 МГц и черная кривая – 245 МГц; температура (черная кривая) и мера эмиссии (светло-серая кривая) вспышечной плазмы по данным GOES, положение КВМ по данным SOHO LASCO C2 и C3 (открытые кружки, черная длинная стрелка – аппроксимация на один солнечный радиус). (б) Наблюдения частиц вблизи Земли: (сверху вниз) темп счета ACS SPI за 50 мс (вычтен фон 5970 отсчетов) сглаженный за 1 с (20 точек) – черная кривая и за 1 мин (1200 точек) – белая кривая; поток электронов SOHO EPHIN в канале 2.64–6.18 МэВ – (1 мин данные – открытые кружки, сглаженные за 5 мин – серая кривая).

от “второй” фазы (+35 мин) связано с высоким уровнем фона. Отметим, что максимальная интенсивность электронов в канале 2.64–6.18 МэВ была сопоставима с той, что наблюдалась в событии M5.5 4 сентября 2017 г.

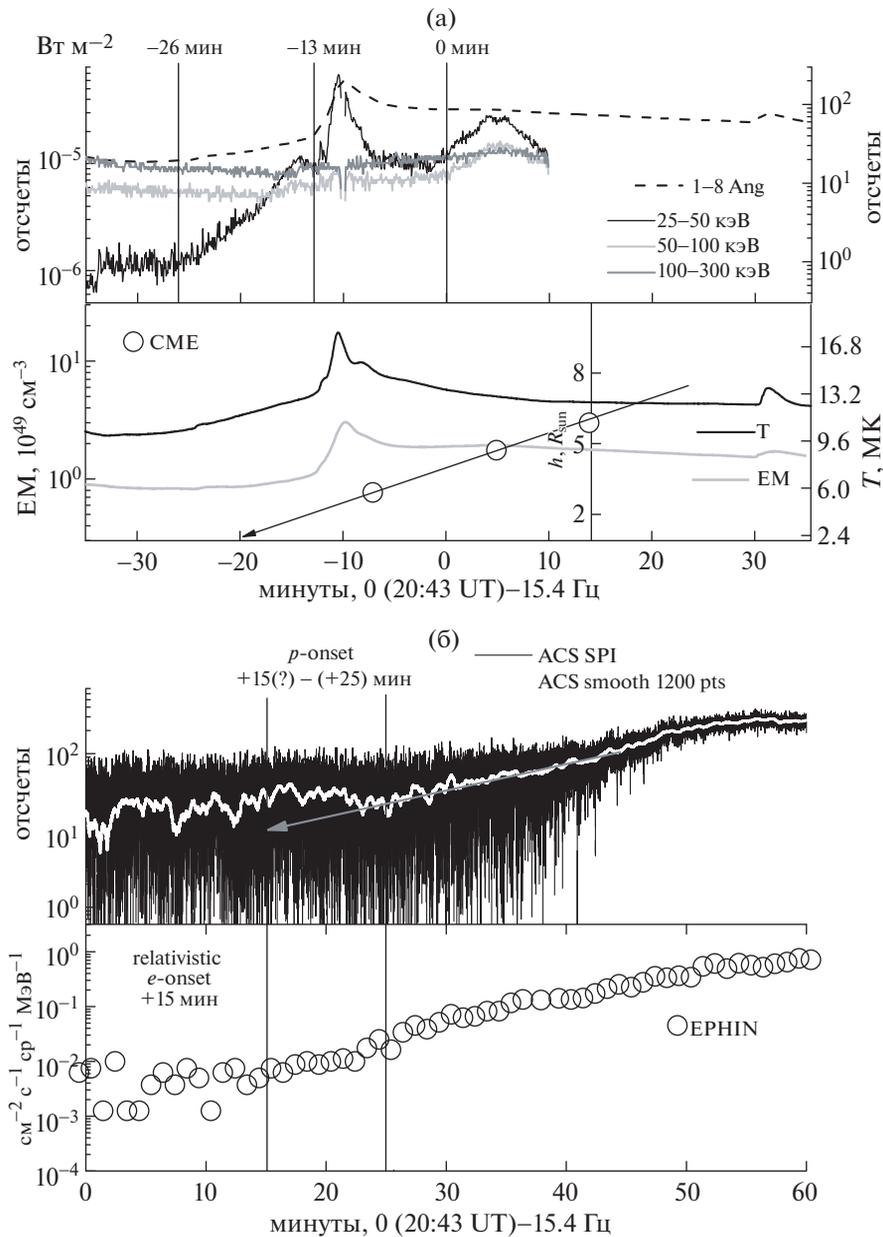
На нижней панели рис. 4б показаны сглаженные за 1 мин данные ACS SPI и протонного детектора GOES >100 МэВ, что подтверждает наши оценки чувствительности ACS SPI к протонам и

оценки времени выхода протонов различной энергии в межпланетное пространство.

Во вспышке X9.3 6 сентября 2017 г. реализовались как “первая”, так и “вторая” фазы.

### 3.4. Вспышка M5.5 и связанные с ней явления 4 сентября 2017 г.

Вспышка M5.5 в SXR-излучении (GOES) началась в 20:28 UT (–15 мин). Однако детектор



**Рис. 5.** Вспышка M5.5 4 сентября 2017 г. (а) Наблюдения Солнца: (сверху вниз) поток SXR (GOES, 1–8 Å, штриховая кривая) и темп счета HXR-детектора RHESSI (черная кривая – канал 25–50 кэВ, светло-серая кривая – 50–100 кэВ; серая кривая – 100–300 кэВ), температура (черная кривая) и мера эмиссии (светло-серая кривая) вспышечной плазмы по данным GOES, положение КВМ по данным SOHO LASCO C2 (открытые кружки, черная длинная стрелка – аппроксимация на один солнечный радиус). (б) Наблюдения частиц вблизи Земли: (сверху вниз) темп счета ACS SPI за 50 мс (вычтен фон 5720 отсчетов) сглаженный за 1 с (20 точек) – черная кривая и за 1 мин (1200 точек) – белая кривая; потоки электронов SOHO EPHIN в канале 2.64–6.18 МэВ – (открытые кружки); потоки протонов по данным протонного детектора >100 GOES и по ASC SPI, усредненные за 1 мин.

RHESSI зарегистрировал начало плавного роста в канале 25–50 кэВ значительно раньше, примерно в 20:17 UT (–26 мин), т.е. предвспышечная стадия в этом событии длилась более 20 мин и сопровождалась ускорением электронов с энергией менее 50 кэВ. Возможно, его источник был аналогичен корональному HXR-источнику, впервые обнаруженному в событии 23 июля 2002 г. [17].

По данным RHESSI рис. 5а четко видно два всплеска HXR-излучения. Первый всплеск начался –13 мин, обладал достаточно мягким спектром (не более 100 кэВ, радиоизлучение на частотах <8.8 ГГц) и совпал с максимумом SXR-вспышки по данным GOES. Малое время запаздывания максимума меры эмиссии относительно максимума температуры (табл. 1) характеризует

импульсный характер вспышки в это время. Второй всплеск наблюдался на фазе спада SXR-излучения, начался одновременно с радиоизлучением на 15.4 ГГц и характеризовался более жестким спектром (до 100 кэВ) и постепенным временным профилем. Отметим, что оба HXR-всплеска соответствуют постэруптивной фазе, так как были зарегистрированы после возможного времени положения KBM на одном солнечном радиусе согласно аппроксимации данных SOHO LASCO C2 (рис. 5а). Своим вторым всплеском HXR-излучения вспышка M5.5 напоминает событие 26 октября 2003 г., рассмотренное в работе [19].

К сожалению, для этого события в настоящее время RSTN-данные с секундным временным разрешением не доступны. Поэтому в этом событии мы ориентируемся на времена начала и максимума радиоизлучения, приведенные в файле 20170904events.txt в отчете SWPC. Согласно данным по радиоизлучению на 410 и 610 МГц (станции Palehua и Sagamore-Hill) активные процессы развивались в короне и ниже длительное время примерно с 20:08 UT (–35 мин) до 21:14 UT (+31 мин). В этом событии присутствовало радиоизлучение II и IV типов, однако, регистрация III типа не упомянута. Особенно подчеркнем, что II тип стал наблюдаться только в момент второго HXR-всплеска с жестким спектром, когда KBM был на высоте более трех радиусов Солнца. Скорее всего, всплещные электроны, захваченные, а не ускоренные вблизи фронта KBM и стали источником радиоизлучения II типа. При этом IV тип радиоизлучения наблюдался непрерывно с 19:08 UT (–95 мин) до 21:26 UT (+43 мин), охватив три последовательные вспышки M1.7, M1.5 и M5.5.

Сравнение рис. 5а и б, показывают, что именно второй HXR-всплеск был источником длительного электронного и протонного события, зарегистрированного в межпланетной среде.

На рис. 6 показаны потоки электронов по данным EPHIN/SOHO. Видно, что возрастание в канале 0.27–0.7 МэВ ( $V/c \sim 0.78–0.91$ ) началось примерно на +2.5 мин, т.е. если электроны были инжектированы в межпланетное пространство в нулевой момент, то пройденный ими путь 1.2. а.е. Тогда электроны в канале 0.67–3 МэВ,  $V/c \sim 0.91–0.99$ , пришедшие на +7.5 мин были инжектированы на +5.8 мин, в канале 2.64–6.18 МэВ  $V/c = 0.99$ , пришедшие на +12.5 мин были инжектированы на +10.8 мин. Это свидетельствует о длительном и постепенном ускорении электронов.

Для протонов с энергиями 100 и 500 МэВ ( $V/c = 0.43$  и  $0.76$ ) время запаздывания относительно электромагнитного излучения будет  $\sim 14$  и 5 мин соответственно. Время прихода первых протонов между +15 (возможно) и +25 мин, тогда в 100 МэВные протоны вышли в МП между 0 и

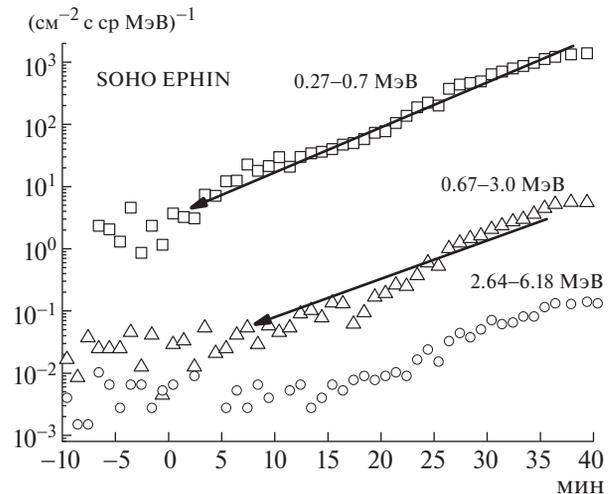


Рис. 6. Поток электронов в каналах 0.27–0.7, 0.67–3.0 и 2.64–6.18 МэВ EPHIN/SOHO (вычтен фон 11, 0.02 и 0.001  $(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{МэВ})^{-1}$ ).

10 мин, а 500 МэВные протоны — между 10 и 20 мин (рис. 5), что совпадает со вторым эпизодом энерговыделения на стадии спада вспышки M5.5. Поэтому, первый HXR-всплеск мы отождествляем с “первой” фазой вспышки, а второй — со “второй” фазой вспышки. Традиционные детекторы протонов возрастания интенсивности в это время не показывали. Релятивистские электроны и протоны должны были быть ускорены во “второй” фазе вспышки, по-видимому, при формировании петельной аркады после максимума SXR-вспышки. Это ускорение не было связано с KBM, так как выброс находился уже на высоте более 4 радиусов Солнца (рис. 5б). Электроны с мягким спектром, ускоренные в первом HXR-всплеске, по всей видимости, не достигли пороговых энергий для их регистрации SOHO EPHIN и/или их интенсивность была ниже фоновой (рис. 5).

Вспышка M5.5 4 сентября 2017 г. имела ярко выраженную “первую” и “вторую” фазы по наблюдениям на Солнце, но зарегистрированные в межпланетной среде протоны и электроны ускорились только во “второй” фазе вспышки.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотренные солнечные вспышки это длительные SXR-события, которые сопровождалось нетепловым излучением в HXR- и радиодиапазонах, где нами выделены “первая” и “вторая” фазы. Величины возрастания потоков СКЛ, наблюдавшиеся в исследуемых событиях, позволяют качественно выстроить “иерархию эффективности” ускорения и условий выхода частиц в межпланетное пространство в “первой” и “второй” фазах. Для первой фазы этот список выглядит

так: X9.3, X2.2, X8.2 и M5.5; а для “второй” фазы: X8.2, X9.3, M5.5 и X2.2.

Моменты возрастания потоков электронов “первой” и “второй” фазы, потока протонов (табл. 1) оказываются одинаково синхронизованными для выбранных вспышек относительно начала радиоизлучения на 15.4 ГГц, что указывает на одинаковые механизмы ускорения вспышечной природы.

Подобие временных профилей протонов и электронов, обладающих близкими скоростями, от “второй” фазы уже неоднократно отмечалось и использовалось [35, 70] как указание на один механизм ускорения. При этом не возникает синхронизации времен положений КВМ на одном солнечном радиусе, полученных по аппроксимации данных LASCO (рис. 2а, 4а и 5а). В табл. 2 и 3 результаты наблюдений на Солнце, описанные в предыдущем разделе, сведены к четырем критериям, которые мы проверяем для “первой” (электроны) и “второй” (электроны и протоны) фаз в межпланетной среде.

Из табл. 2 следует, что релятивистские электроны в “первой” фазе вспышки не наблюдались, если на Солнце отсутствовали условия для их ускорения.

Табл. 3 и описанные выше наблюдательные данные дают следующие аргументы для выбора механизма ускорения электронов и протонов во “второй” фазе. Подобие временных профилей электронов и протонов (рис. 5б, 4б, 2б) свидетельствует об одинаковом механизме ускорения и распространения. Для объяснения временных профилей протонов в межпланетном пространстве необходимо предположить их длительную инжекцию, которая может реализоваться за счет либо длительного ускорения, либо захвата. Так как временные профили протонов подобны электронным, а их длительный захват невозможен, то из двух вариантов следует выбрать длительное ускорение. Длительное ускорение протонов возможно или на постэруптивной фазе вспышки, или на ударной волне КВМ. Поскольку релятивистские электроны “второй” фазы не могли быть ускорены на ударной волне [3, 28], то остается одна возможность: стохастическое ускорение на постэруптивной фазе.

На основе наблюдений солнечных вспышек 4–10 сентября 2017 г. и связанных с ними событий СКЛ в межпланетной среде можно сформулировать следующий сценарий ускорения электронов и протонов. В солнечных вспышках реализуется стохастический механизм ускорения, в котором протоны и электроны приобретают энергию в элементарных актах ускорения, чья длительность много меньше длительности самой вспышки [3, 63, 64]. Для согласования стохастического процесса ускорения [63] и существования

**Таблица 2.** Релятивистские электроны в межпланетном пространстве (первая фаза)

Событие	M5.5	X2.2	X9.3	X8.2
Электроны	нет	да	да (много)	да (мало)
Длительное ускорение	да	да	да	да
Излучение HXR, >100 кэВ	нет	да	да	да
VI тип	да	нет	нет	да
II тип	нет	нет	нет	да [47]

**Таблица 3.** Релятивистские электроны и протоны в межпланетном пространстве (вторая фаза, постэруптивная). Для события M5.5 мы разделяем развитие вспышки до и после нулевого времени (первый и второй HXR-всплески)

Событие	M5.5	X2.2	X9.3	X8.2
Электроны и протоны	нет/да	нет	да (мало)	да (много)
Длительное ускорение	да/да	да	да	да
Излучение HXR, >100 кэВ	нет/да	да	да	да
VI тип	да/да	нет	да	да
II тип	нет/да	нет	да	да

двух фаз в солнечной вспышке [13, 27], а также электронных и протонных событий в межпланетном пространстве [9, 23, 24, 27] необходимо учитывать энергетические потери электронов на излучение. Гиротронные потери на излучение “запирают” (не дают ускоряться до более высоких энергий) стохастический процесс ускорения электронов, но не протонов, поясним это ниже.

В обзоре [3] приведен пример стохастического ускорения электрона за 400 мс. Если протоны и электроны ускоряются электрическим полем в элементарном акте, то за один акт ускорения они приобретут разную энергию и времена ускорения также будут отличаться. Для достижения протоном такого же релятивистского фактора как у 100 кэВ электрона (этот протон обладает энергией  $\sim 200$  МэВ), понадобится время в  $m_p/m_e$  раз большее, т.е. примерно 12 мин от первого акта ускорения. В работе [39] сделаны оценки максимальной энергии электронов в случае длительного стохастического ускорения. Эта энергия определяется гиротронным излучением и оказывается равной примерно 10 МэВ при длительности вспышки порядка 5–10 мин и магнитном поле 500–1000 Гс. Таким образом, в случае стохастического ускорения протонов до энергии порядка  $\sim 200$  МэВ и даже больше, энергия электронов вряд ли превысит 10 МэВ. Энергия электронов может достигать нескольких десятков МэВ в одиночных актах [65].

Собственно вспышка может состоять из множества элементарных актов ускорения стохастически распределенных в хромосфере и короне [66–68] как в “первой”, так и во “второй” фазах. Элементарные акты могут отличаться друг от друга длительностью и энергией, их скважность по времени не постоянная. Физические механизмы ускорения в элементарных актах могут быть различными, они не важны в предлагаемом сценарии. В “первой” фазе энергия ускоренных электронов во вспышке еще не достигла максимально возможной величины, а энергия протонов мала для их регистрации на Солнце по гамма-излучению (“молчащие” протоны). Радиационные потери и продолжающееся ускорение выравнивают (усредняют) спектры электронов, ускоренных в различных элементарных актах.

Во “второй” фазе электроны достигают максимально возможной энергии (максимальная энергия ускорения во вспышке), а их продолжающееся ускорение приводит к ужесточению спектра, что и объясняет закон Киплингера (“soft-hard-harder”). Энергия же протонов постепенно увеличивается и может достичь во “второй” фазе величин достаточных для их регистрации по гамма-излучению, а в самых редких случаях — и релятивистских энергий. При этом, примерно половина полной энергии частиц, ускоренных во вспышке, должна приходиться на протоны малых энергий. Необходимость и важность учета протонов с энергией от 10 кэВ до 1 МэВ отмечена в обзоре [3], возможно, работа [39] была первой, в которой авторы обратили внимание на роль протонов. Частицы, ускоренные в обеих фазах солнечных вспышек, могут наблюдаться в межпланетном пространстве при благоприятных условиях выхода.

Роль КВМ в рассматриваемом сценарии ускорения частиц в длительных вспышках не вызывает сомнений. Во-первых, подъем КВМ обеспечивает вовлечение во вспышечный процесс все большего числа петель в большом диапазоне высот от хромосферы до короны. Во-вторых, КВМ может играть роль зеркала, возвращающего ускоренные частицы в область вспышки (в новые акты ускорения). В-третьих, КВМ доускоряет частицы многократно пересекающие его фронт, обеспечивает им условия их выхода в межпланетное пространство в широком пространственном угле. Таким образом, предложенный сценарий объединяет вместе два, казалось бы, непримиримых подхода — ускорение во вспышках и на ударных волнах КВМ. Рассмотрим в контексте предложенного сценария события 4–10 сентября 2017 г. (рис. 1).

В “первой” фазе можно наблюдать несколько импульсов жесткого рентгеновского и микроволнового излучения, соответствующих “сгусткам” элементарных актов ускорения. Наибольший эффект от ускорения в “первой” фазе в межпланет-

ной среде можно ожидать при наблюдении нескольких высокоэнергичных импульсов (величина энергии, приобретаемая в отдельном сгустке), этому условию соответствуют вспышки X9.3 и X2.2 6 сентября 2017 г. Возможно, большая энергия ускорения в импульсе связана с тем, что они происходили в хромосфере, в области сильного магнитного поля [69]. Импульсы HXR- и микроволнового излучения в этих вспышках наблюдались до КВМ, эффективного возврата частиц в область ускорения не происходило. Напротив, первая фаза в событиях M5.5 4 сентября и X8.2 10 сентября 2017 г. развивалась преимущественно в короне, и энергия, приобретаемая в элементарном акте, была незначительной, но КВМ эффективно возвращал частицы в область ускорения и способствовал постепенному ускорению. Элементарные акты ускорения перекрывались между собой, образуя постепенный (гладкий) временной профиль HXR-излучения (вспышки M5.5 и X8.2 по данным RHESSI) и на микроволнах (15.4 ГГц, вспышка X8.2). Отсутствие возрастания электронов после первого всплеска HXR во вспышке M5.5 можно объяснить их малой энергией и/или интенсивностью для детектирования SOHO EPIN (рис. 5a).

“Вторая” фаза ускорения была наиболее эффективной во вспышке X8.2 10 сентября 2017 г., а особенно ярко была выражена во вспышке M5.5 4 сентября 2017 г. Потоки протонов и электронов, ускоренных во “второй” фазе, характеризовались вблизи Земли подобными друг другу временными профилями, следовательно, протоны и электроны могли быть ускорены одним физическим механизмом и распространялись до Земли одинаковым образом. “Вторая” фаза (ускорение электронов и протонов) присутствовала во всех рассмотренных вспышках, кроме X2.2, т.е. наличие КВМ — это необходимое условие для “второй” фазы ускорения. Это условие не является достаточным, так как еще необходимо, чтобы электроны достигали релятивистских энергий в элементарных актах. Таким образом, необходимым и достаточным условием развития второй фазы вспышек является наличие КВМ и пост-эруптивного ускорения электронов до релятивистских энергий.

Для наблюдательной проверки предложенного сценария ускорения протонов и электронов необходимы пространственно чувствительные спектрометры рентгеновского и гамма-диапазонов нового поколения, превосходящие характеристики существующих на один-два порядка, а также детекторы релятивистских протонов и электронов в межпланетном пространстве [52]. Возможно, новые измерения протонов и электронов вблизи Солнца на КА Parker Solar Probe и Solar Orbiter в следующем цикле солнечной активности подтвердят сделанные предположения.

## 5. ВЫВОДЫ

Во вспышках M5.5 4-го, X2.2 и X9.3 6-го, X8.2 10-го сентября 2017 г. выделены “первая” и “вторая” фазы вспышки, причем в межпланетной среде от “первой” фазы наблюдаются только электроны, а от “второй” — электроны и протоны. События на Солнце и в межпланетной среде рассмотрены относительно нулевого времени — начала радиоизлучения на 15.4 ГГц. В этом случае оказываются синхронизованными начала возрастаний над фоном детекторов от электронов “первой” фазы (между 3–6 мин), электронов и протонов от “второй” фазы (между 15–35 мин). Временные профили электронов и протонов от “второй” фазы подобны. Задержка времени между приходом электронов “первой” фазы и приходом протонов “второй” является характерным временем ускорения протонов. Такое четкое проявление “первой” и “второй” фазы вспышек в межпланетной среде, разное в каждом из четырех событий, позволит выяснить специфические свойства “первой” и “второй” фаз ускорения на Солнце. События сентября 2017 года в этом случае могли бы рассматриваться как базисные для интерпретации других событий. События сентября 2017 г. могут стать “Roseta stone” для проблемы ускорения солнечных космических лучей.

Приведенные наблюдения не противоречат сценарию стохастического ускорения, в котором протоны и электроны одновременно приобретают энергию в элементарных актах, чья длительность много меньше длительности самой вспышки. Для согласования стохастического процесса ускорения и существования двух фаз в солнечных вспышках необходимо учитывать во второй фазе гиросинхротронные потери электронов на излучение, которыми в первой фазе можно пренебречь. Энергия ускоренных протонов в первой фазе мала для их обнаружения на Солнце, но во второй фазе она может достичь величин, достаточных для детектирования ядерных гамма-линий.

Роль коронального выброса массы в рассматриваемом сценарии заключается в привлечении во вспышечный процесс все большего числа петель в диапазоне высот от хромосферы до короны; в возвращении ускоренных частиц в область вспышки, в дополнительном ускорении частиц на фронте ударной волны и в обеспечении им условий выхода в межпланетное пространство в широком пространственном угле.

Авторы благодарят участников наземных и космических экспериментов, данные которых находятся в открытом доступе и были использованы в работе (GOES, RSTN, ACS SPI, RHESSI, SOHO/EPHIN, NMDB). We acknowledge the NMDB database ([www.nmdb.eu](http://www.nmdb.eu)), founded under the European Union’s FP7 programme (contract no. 213007) for providing data. Также авторы благодар-

ны анонимным рецензентам, чьи замечания были конструктивными и полезными.

Работа Струминского А.Б. и Садовского А.М. выполнена (ИКИ РАН) — за счет субсидии по государственному заданию “Плазма”. Работа Григорьевой И.Ю. (ГАО РАН) осуществлялась по программе “Энерговыделение” и частично поддержана Программой фундаментальных исследований РАН 12 “Вопросы происхождения и эволюции Вселенной”.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aschwanden M.J.* // Space Sci. Rev. 2012. V. 171. P. 3.
2. *Benz A.* // Living Rev. Solar Phys. 2017. V. 14. P. 2.
3. *Miller J.A., Cargill P.J., Emslie A., Holman G.D., Dennis B.R., LaRosa T.N., Winglee R.M., Benka S.G., Tsuneta S.* // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 14631.
4. *Fletcher L., Dennis B.R., Hudson H.S., Krucker S., Phillips K., Veronig A., Battaglia M., Bone L., Caspi A., Chen Q., Gallagher P., Grigis P.T., Ji H., Liu W., Milligan R.O., Temmer M.* // Space Sci. Rev. 2011. V. 159. P. 19.
5. *Chupp E.L.* // Solar Phys. 1983. V. 86. P. 383.
6. *De Jager C.* // Solar Flares and Space Research, Proc. Symp., 11th Plenary Meeting of the Committee on Space Research, Tokyo, Japan, May 9–11, 1968 / Eds C. de Jager, Z. Svestka. Amsterdam: North-Holland Publication Co., 1969. P. 1.
7. *Wild J.P., Smerd S.F., Weiss A.A.* // Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1963. V. 1. P. 291.
8. *Bai T., Ramaty R.* // Solar Phys. 1976. V. 49. P. 343.
9. *Krucker S., Larson D.E., Lin R.P.* // Astrophys. J. 1999. V. 519. P. 864.
10. *Ramaty R., Murphy R.J., Dermer C.D.* // Astrophys. J. 1987. V. 316. P. L41.
11. *Frost K.J., Dennis B.R.* // Astrophys. J. 1971. V. 165. P. 655.
12. *Share G.H., Murphy R.J., White S.M., Tolbert A.K., Dennis B.R., Schwartz R.A., Smart D.F., Shea M.A.* // Astrophys. J. 2018. V. 869. P. 182.
13. *Shih A.Y., Lin R.P., Smith D.M.* // Astrophys. J. 2009. V. 698. P. L152.
14. *Bai T., Sturrock P.* // Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1989. V. 27. P. 421.
15. *Dennis B.R., Schwartz R.A.* // Solar Phys. 1989. V. 121. P. 75; Discussion P. 463, 464.
16. *Svestka Z.* // Solar Phys. 1989. V. 121. P. 399; Discussion, P. 500.
17. *Lin R.P., Krucker S., Hurford G.J., Smith D.M., Hudson H.S., Holman G.D., Schwartz R.A., Dennis B.R., Share G.H., Murphy R.J., Emslie A.G., Johns-Krull C., Vilmer N.* // Astrophys. J. 2003. V. 595. P. L69.
18. *Kai K., Nakajima H., Kosugi T., Stewart R.T., Nelson G.J., Kane S.R.* // Solar Phys. 1986. V. 105. P. 383.
19. *Zimovets I., Struminsky A.* // Solar Phys. 2012. V. 281. P. 749.
20. *Grechnev V.V., Kiselev V.I., Kashapova L.K., Kochanov A.A., Zimovets I.V., Uralov A.M., Nizamov B.A.,*

- Grigorieva I.Y., Golovin D.V., Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Sanin A.B. // Solar Phys. 2018. V. 293. P. 133.
21. Omodei N., Pesce-Rollins M., Longo F., Allafort A., Krucker S. // Astrophys. J. 2018. V. 865. P. L7.
  22. Hudson H. // Proc. Internat. Astron. Union, IAU Symp. 2018. V. 335. P. 49.
  23. Kallenrode M.-B., Wibberenz G. // Astrophys. J. 1991. V. 376. P. 787.
  24. Cane H.V., McGuire R.E., von Roseninge T.T. // Astrophys. J. 1986. V. 301. P. 448.
  25. Cane H.V., Richardson I.G., von Roseninge T.T. // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. P. A08101.
  26. Cliver E.W. // Astrophys. J. 2016. V. 832. P. 128.
  27. Ramaty R., Colgate S.A., Dulk G.A., Hoyng P., Knight J.W., III, Lin R.P., Melrose D.B., Paizis C., Or-rall F., Shapiro P.R. // Proc. of the 2nd SKYLAB Workshop on Solar Flares. 1978. Ch. 4. P. 117.
  28. Kahler S.W. // Solar Phys. 1984. V. 90. P. 133.
  29. Cliver E.W., Kahler S.W., Reames D.V. // Astrophys. J. 2004. V. 605. P. 902.
  30. Bazilevskaya G.A. // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 798. P. 012034.
  31. Grechnev V.V., Kiselev V.I., Meshalkina N.S., Chertok I.M. // Solar Phys. 2015. V. 290. P. 2827.
  32. Cliver E.W. // Proc. IAU Symp. 2009. V. 257. P. 401.
  33. Мирошниченко Л.И. // УФН. 2018. Т. 188. С. 345.
  34. Struminsky A.B. // Space Weather of the Heliosphere: Processes and Forecasts, Proc. Internat. Astronom. Union, IAU Symp. 2018. V. 335. P. 43.
  35. Kahler S.W. // Space Sci. Rev. 2007. V. 129. P. 359.
  36. Cane H.V., Erickson W.S., Prestage N.P. // J. Geophys. Res. (Space Physics) 2002. V. 107. P. 1315.
  37. Cane H.V. // Astrophys. J. 2003. V. 598. P. 1403.
  38. Cliver E.W., Ling A.G. // 2009. V. 690. P. 598.
  39. Svestka Z. // Solar Phys. 1970. V. 13. P. 471.
  40. Klassen A., Krucker S., Kunow H., Müller-Mellin R., Wimmer-Schweingruber R., Mann G., Posner A. // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2005. V. 110. P. A09S04.
  41. Cliver E.W., Kahler S.W., Shea M.A., Smart D.F. // Astrophys. J. 1982. V. 260. P. 362.
  42. Xie H., Mäkelä P., Gopalswamy N., St. Cyr O.C. // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2016. V. 121. P. 6168.
  43. Posner A. // Space Weather. 2007. V. 5. P. 05001.
  44. Klein K.L. // Solar Eruptions and Energetic Particles. Geophys. Monograph Ser. Vol. 165 / Eds. N. Gopalswamy, R. Mewaldt, J. Torsti. AGU, 2006. P. 233.
  45. Chertok I.M. // Geomagn. Aeronomy. 2018. V. 58. P. 457.
  46. Bruno A., Christian E.R., de Nolfo G.A., Richardson I.G., Ryan J.M. // Space Weather 2019. V. 17. P. 419; arXiv:1902.03969.
  47. Gopalswamy N., Yashiro S., Mäkelä P., Xie H., Akiyama S., Monstein C. // Astrophys. J. 2018. V. 863. P. L39.
  48. Gary D.E., Chen B., Dennis B.R., Fleishman, Gregory D., Hurford G.J., Krucker S., McTiernan J.M., Nita G.M., Shih A.Y., White S.M., Yu S. // Astrophys. J. 2018. V. 863. P. 83.
  49. Zhao Ming-Xian, Le Gui-Ming, Chi Yu-Tian // Res. Astron. Astrophys. 2018. V. 18. P. 074.
  50. Kurt V., Belov A., Kudela K., Yushkov B. // Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso. 2018. V. 35. P. 1.
  51. Kurt V., Belov A., Kudela K., Mavromichalaki H., Kashapova L., Yushkov B., Sgouropoulos C. // Solar Phys. 2019. V. 294. P. 22.
  52. Струминский А.Б. // Изв. РАН. Сер. физич. 2019. Т. 5. С. 597. (Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2019. Vol. 83. No. 5. p. 538).
  53. Григорьева И.Ю., Струминский А.Б. // Труды XXII Всерос. конф. по физике Солнца “Солнечная и солнечно-земная физика-2018” // Ред. А.В. Степанов и Ю.А. Наговицын. СПб.: ГАО РАН, 2018. С. 123.
  54. Григорьева И.Ю., Струминский А.Б. // Труды XXII Всерос. конф. по физике Солнца “Солнечная и солнечно-земная физика-2018” / Ред. А.В. Степанов и Ю.А. Наговицын. СПб.: ГАО РАН, 2018. С. 127.
  55. Lin R.P., Dennis B.R., Hurford G.J., Smith D.M., Zehnder A., Harvey P.R., Curtis D.W., Pankow D., Turin P., Bester M., Csillaghy A., Lewis M., Madden N., van Beek H.F., Appleby M., Raudorf T., McTiernan J., Ramaty R., Schmahl E., Schwartz R., Krucker S., Abiad R., Quinn T., Berg P., Hashii M., Sterling R., Jackson R., Pratt R., Campbell R.D., Malone D., Landis D., Barrington-Leigh C.P., Slassi-Sennou S., Cork C., Clark D., Amato D., Orwig L., Boyle R., Banks I.S., Shirey K., Tolbert A.K., Zarro D., Snow F., Thomsen K., Henneck R., McHedlishvili A., Ming P., Fivian M., Jordan John, Wanner Richard, Crubb Jerry, Preble J., Matranga M., Benz A., Hudson H., Canfield R.C., Holman G.D., Crannell C., Kosugi T., Emslie A.G., Vilmer N., Brown J.C., Johns-Krull C., Aschwanden M., Metcalf T., Conway A. // Solar Phys. 2002. V. 210. P. 3.
  56. Rodríguez-Gasén R., Kiener J., Tatischeff V., Vilmer N., Hamadache C., Klein K.-L. // Solar Phys. 2014. V. 289. P. 1625.
  57. Struminsky A.B., Zimovets I.V. // 21st ECRS, Košice, Slovakia, Slovak Academy of Sciences, 2009. P. 237.
  58. Yashiro S., Gopalswamy N., Michalek G., St. Cyr O.C., Plunkett S.P., Rich N.B., Howard R.A. // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. P. A07105.
  59. Kiplinger A.L. // Astrophys. J. 1995. V. 453. P. 973.
  60. Struminsky A.B. // Geomagnetism Aeronomy 2013. V. 53. P. 843.
  61. Струминский А.Б., Зимовец И.В. // Письма Астрон. Ж. 2007. Т. 33. С. 690.
  62. Lysenko A.L., Anfinogentov S.A., Svinkin D.S., Frederiks D.D., Fleishman G.D. // Astrophys. J. 2019. V. 877. P. 145.
  63. Vlahos L. // Solar Phys. 1989. V. 121. P. 431.
  64. Machado M.E., Ong K.K., Emslie A.G., Fishman G.J., Meegan C., Wilson R., Paciesas W.S. // Adv. Space Res. 1993. V. 13. P. 175.
  65. Kane S.R., Chupp E.L., Forrest D.J., Share G.H., Rieger E. // Astrophys. J. 1986. V. 300. P. L95.
  66. Vlahos L., Georgoulis M., Kluiwing R., Paschos P. // Astron. Astrophys. 1995. V. 299. P. 897.
  67. Lu E.T., Hamilton R.J. // Astrophys. J. 1991. V. 380. P. L89.
  68. Benz A. // Solar Phys. 1985. V. 96. P. 357.
  69. Лившиц М.А., Белов А.В. // Астрон. ж. 2004. Т. 81. С. 732.
  70. Lin R.P., Mewaldt R.A., Van Hollebeke M.A.I. // Astrophys. J. 1982. V. 253. P. 949.