

ДВЕ ФАЗЫ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК И СТОХАСТИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ И ПРОТОНОВ

А.Б.СТРУМИНСКИЙ¹, И.Ю.ГРИГОРЬЕВА², Ю.И.ЛОГАЧЕВ³,
А.М.САДОВСКИЙ¹

Поступила 6 сентября 2019

Принята к печати 24 июня 2020

Хорошо известна гипотеза о реализации в солнечных вспышках двух фаз ускорения заряженных частиц, когда в первой фазе ускоряются субрелятивистские электроны, а во второй - релятивистские электроны и протоны. В солнечных протонных событиях и их родительских вспышках 26 декабря 2001г. (M7.1), 2 ноября 2003г. (X8.3) и 9 августа 2011г. (X6.9) выделены первая и вторая фазы, причем в межпланетной среде от первой фазы наблюдались только электроны, а от второй - электроны и протоны. Временные профили электронов и протонов от второй фазы подобны, отсюда сделан вывод о преимущественном ускорении релятивистских электронов и протонов, наблюдаемых в межпланетной среде, во вспышках, а не на ударном фронте коронального выброса массы. По всей видимости, во вспышках реализуется стохастический механизм ускорения, в котором протоны и электроны приобретают энергию во многих элементарных актах на всем протяжении вспышки, причем ее длительность много больше длительности элементарного акта. 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 по процессам, происходящим на Солнце, но во второй фазе она может достичь величин достаточных для возникновения гамма-линий - ядерных и от распада пионов.

Ключевые слова: *солнечные вспышки; рентгеновское и радиоизлучение; корональный выброс массы; ускорение солнечных протонов и электронов; солнечные электронные и протонные события*

1. **Введение.** Солнечные протонные события 4, 6 и 10 сентября 2017г. побудили нас вновь обратиться к гипотезе о реализации во вспышках двух фаз ускорения заряженных частиц [1-3], когда в первой фазе ускоряются преимущественно электроны с энергией <100 кэВ, а во второй - электроны >100 кэВ и протоны.

В этих событиях по данным детектора SOHO/EPHIN (релятивистские электроны) и Антисовпадатальной защиты спектрометра на КА ИНТЕГРАЛ (ACS SPI, >100 МэВ протоны) удалось разделить вблизи Земли электроны и протоны, ускоренные в первой и второй фазах вспышек [4-6]. При этом оказалось, что после вспышек X9.3 6 сентября и X8.2 10 сентября 2017г. в

межпланетном пространстве (МП) наблюдались как электроны, ускоренные в первой фазе, так и электроны и протоны от второй фазы. А после вспышки M5.5 4 сентября 2017г. наблюдались только электроны и протоны от второй фазы [4-6]. По всей вероятности, количество и энергия электронов, ускоренных в первой фазе вспышки M5.5 4 сентября 2017г., были недостаточными для их регистрации SOHO/EPHIN [5].

При дальнейшем исследовании этих событий [7] была высказана идея о том, что в связанных с ними вспышках реализовался стохастический механизм ускорения, в котором протоны и электроны приобретают энергию во многих элементарных актах, чья длительность много меньше длительности самой вспышки [8-10]. Для согласования стохастического процесса ускорения и наблюдения двух фаз в солнечных вспышках, по всей видимости, во второй фазе необходимо учитывать гиротронные потери электронов на излучение [11], которыми в первой фазе можно пренебречь. В этом случае первая и вторая фазы различаются только тем, что энергия ускоренных протонов мала для их обнаружения на Солнце в первой фазе, но она может достичь величин, достаточных для генерации ядерных гамма-линий и π -мезонов во второй фазе. Это предположение основано на том, что, если время ускорения электронов до 100 кэВ составляет порядка 400 мс [10], то для ускорения протонов до такой же скорости (200 МэВ) потребуется время ~ 12 мин (m_p/m_e раз больше). Откуда следует длительность первой фазы, равная нескольким минутам [7].

Мы считаем, что первая фаза вспышки реализуется всегда, если на Солнце зарегистрировано нетепловое электромагнитное излучение, а вторая фаза вспышки реализуется только в том случае, если на Солнце регистрировались ядерные гамма-линии или в межпланетном пространстве наблюдались ускоренные протоны [7]. Если нет данных по ядерным гамма-линиям, но протоны > 30 МэВ наблюдались в МП, то начало второй фазы можно оценить по времени их прихода на Землю.

Для реализации второй фазы необходим корональный выброс массы (КВМ). Его роль 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 МП в широком пространственном угле.

Следующей очевидной задачей является проверка высказанных предположений на примере других протонных событий и их родительских вспышек. В данном исследовании выбраны солнечные вспышки M7.1 26 декабря 2001г. [12-14], X6.9 9 августа 2011г. [15] и X8.3 2 ноября 2003г. [16], которые по своим свойствам аналогичны, соответственно, вспышкам: M5.5 4 сентября 2017г. - слабой и длительной, X9.3 6 сентября 2017г. - мощной импульсной

и X8.2 10 сентября 2017г. – мощной длительной. Анализ свойств наблюдаемых потоков мягкого рентгеновского (soft X-ray – SXR) излучения в этих вспышках позволяет предположить, что и потоки электронов и протонов в межпланетной среде, наблюдавшиеся вблизи Земли, обладали сходными свойствами.

2. Инструменты и методы. Здесь для исследования свойств популяций частиц, ускоренных в первой и второй фазах солнечных вспышек, мы будем сравнивать потоки релятивистских электронов (SOHO/EPHIN) с данными по высокоэнергичным протонам (потоки протонов >100 МэВ, (GOES), темп счета нейтронных мониторов (НМ) и детектора ACS SPI). Так как фазы различаются наличием или отсутствием гиросинхротронного излучения, то за ноль времени мы принимаем начало первого видимого роста его потока на частоте 15.4 ГГц. Это время не всегда совпадает со временем начала излучения на 15.4 ГГц в файлах (YYYYMMDDevents.txt).

Введение нулевого времени позволяет сравнивать в одной временной шкале различные события. Выбранный ноль времени можно рассматривать как момент появления релятивистских электронов в атмосфере Солнца и как условную границу между первой и второй фазами. Отметим, что, согласно [17], время инжекции протонов с энергиями в несколько ГэВ соответствует времени первого значимого максимума микроволнового излучения.

Данные интегральных протонных каналов GOES доступны на сайте (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/NOAA/particle/). Данные по потокам релятивистских электронов в каналах 0.27-0.7, 0.67-3.0 и 2.64-10.4 МэВ дает детектор EPHIN на SOHO (www2.physik.unikiel.de/SOHO/phperph/EPHIN.htm). Отношение скорости электронов к скорости света V/c соответственно находится в пределах 0.78-0.91, 0.91-0.99, 0.99. Если длина силовой линии, по которой распространяются частицы, минимальная (т.е. ~ 1.2 а.е.), то время запаздывания электронов в дифференциальных каналах относительно электромагнитного излучения будет ~ 4 , 3 и 2 мин. Для протонов с энергиями 30, 100 и 500 МэВ ($V/c = 0.25$, 0.43 и 0.76) время запаздывания будет ~ 30 , 15 и 5 мин.

Для выбора НМ, показавшего самое быстрое начало наземного возрастания GLE (Ground Level Enhancement) интенсивности космических лучей, мы использовали последовательно две базы данных. База данных по GLE событиям Университета Оулу (<http://cosmicrays.oulu.fi/GLE.html>) позволяет выбирать семь НМ, показавших лучшие временные профили по 5-мин данным. Далее мы сравнивали 1-мин данные семи выбранных НМ, которые выложены на сайте (<http://www.nmdb.eu/nest/search.php>), и отбирали из них НМ, показавший самое быстрое начало GLE. В обоих случаях им оказался НМ SOPO (South Pole) с нулевым порогом геомагнитного обрезания, т.е. регистрирующий протоны с энергиями >500 МэВ.

Данные ACS SPI доступны для двух исследуемых нами событий, так как КА INTEGRAL был выведен на орбиту только в конце 2002г. Детектор ACS SPI регистрирует фотоны с энергией >150 кэВ ([http://isdc.unige.ch/\\$/sim\\$savchenk/spiacs-online/spiacs.pl](http://isdc.unige.ch/$/sim$savchenk/spiacs-online/spiacs.pl)). В момент солнечных вспышек с жестким рентгеновским (HXR) излучением ACS SPI в основном регистрирует первичные солнечные фотоны. Детектор ACS SPI регистрирует также и вторичные фотоны, рожденные протонами с энергией >100 МэВ. В некоторых солнечных протонных событиях ACS SPI оказывается более чувствительным детектором протонов, чем НМ [18]. Этого не произошло 2 ноября 2003г. на фоне мощной солнечной гамма-вспышки [15]. Мы используем ACS SPI, как некалиброванный детектор высокоэнергичных протонов в событии 9 августа 2011г., которое не сопровождалось потоками протонов высоких энергий, регистрируемых НМ.

Для рассмотренных событий, времена регистрации радио и SXR излучения взяты из открытого доступа (Radio Solar Telescope Network (RSTN): <ftp.ngdc.noaa.gov/STP/space-weather/solar-data/solar-features/solar-radio/> и GOES: <satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/> соответственно). Для того, чтобы представить себе развитие вспышки на разных уровнях атмосферы Солнца, мы выбрали три характерных частоты RSTN - 15.4 ГГц (хромосфера и выше), 2695 МГц (верхняя хромосфера и выше) и 245 МГц (корона и выше). Плазменный и гиросинхротронный механизмы радиоизлучения дают различный вклад на этих частотах.

Информация по KBM взята из каталога SOHO LASCO CME CATALOG (cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/). 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. *Наблюдения и оценки.* Некоторые характеристики рассматриваемых событий представлены в табл.1. Времена в минутах приведены относительно выбранного в каждом событии нулевого времени (кроме интервала между максимумами температуры и меры эмиссии). В таблице приведены следующие величины: А - дата, нулевое время, координаты и балл вспышки, В - начало и максимум вспышки мягкого рентгеновского излучения (SXR) по GOES; С - время максимума температуры, время запаздывания максимума меры эмиссии (относительно максимума температуры); D - время первого появления KBM (LASCO_C2) и его скорость в км/с; Е - наименьшая частота, регистрируемого RSTN излучения, времена его начала и максимума; F - время начала и максимума излучения на 15.4 ГГц, его величина (СЕП); G - время начала радио всплесков III, II и IV типов; H - время начала роста >100 МэВ GOES, НМ (GLE), электронов SOHO EPHIN 2.64-6.12 кэВ от первой и второй фаз вспышки.

Таблица 1

НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАССМАТРИВАЕМЫХ СОБЫТИЙ

A	B	C	D	E	F	G	H
26.12.2001 05:04 M7.1 N08W54	-32/+36	+14/26	+26 1446	410 -9/+53	-11/+3 1800	нет/-2/+16	+41/+42/нет(+35)
02.11.2003 17:09 X8.3 S14W56	-6/+16	+10/7	+21 2598	245 +4/+6	-4/+7 30000	нет/+5/+5	+23/+25/+10(+33)
09.08.2011 0801 X6.9 N17W69	-5/+5	+2/2	+11 1610	245 -1/+1	0/+2 1600	+16/0/+19	+15/нет/+3(+15)

Обсудим событие 26 декабря 2001г., представленное на рис.1. Вспышка начинается с нагрева в хромосфере в 04:32 UT (-32 мин), возможно, в результате ускорения электронов с энергией десятки кэВ. Идет длительная предвспышечная фаза в хромосфере, которая медленно и постепенно развивается как вверх в корону, так и вниз к сильному магнитному полю. О движении вверх говорит появление радиоизлучения на все более низких частотах (4995 МГц в 04:35 UT (-31 мин), 2695 МГц в 04:38 UT (-26 мин) и 245 МГц в 04:49 UT (-15 мин) (см. 20011226 events.txt)). Превышение потоков радиоизлучения над фоном на 8.8 ГГц в 04:39 UT (-25 мин) и 15.4 ГГц в 04:53 UT (-11 мин) свидетельствует о постепенном ужесточении спектра ускоренных электронов и смещении области их взаимодействия к сильному магнитному полю.

Ускоренные электроны не достигали нижней границы хромосферы вплоть до 05:04 UT, так как по SXR данным GOES мера эмиссии практически не менялась. Этот момент выбран нами как ноль времени, который совпадает с началом "импульсной" фазы вспышки [12-14]. Она длится до начала пост-эруптивной фазы (образование KBM в 05:09 UT (+5 мин), "jet-like eruption", согласно [13-14]).

Наблюдения солнечных протонов и электронов вблизи Земли показаны на рис.1b, с. Для оценок мы предполагаем, что частицы в этом событии распространялись до Земли по минимальному пути (1.2 а.е.). Возрастания темпа счета НМ SOPO (протоны >500 МэВ) и потока протонов GOES >100 МэВ над фоном начались в +42 мин и +41 мин, т.е. они вышли в МП не ранее, чем на +37 мин и +26 мин. Поток электронов в канале 2.64-10.4 МэВ показал возрастание над фоновыми значениями на +35 мин, они вышли в МП на +33 мин, т.е. почти одновременно с протонами >500 МэВ. Временные профили, приведенные на рис.1b, подобны примерно с +40 по +80 мин.

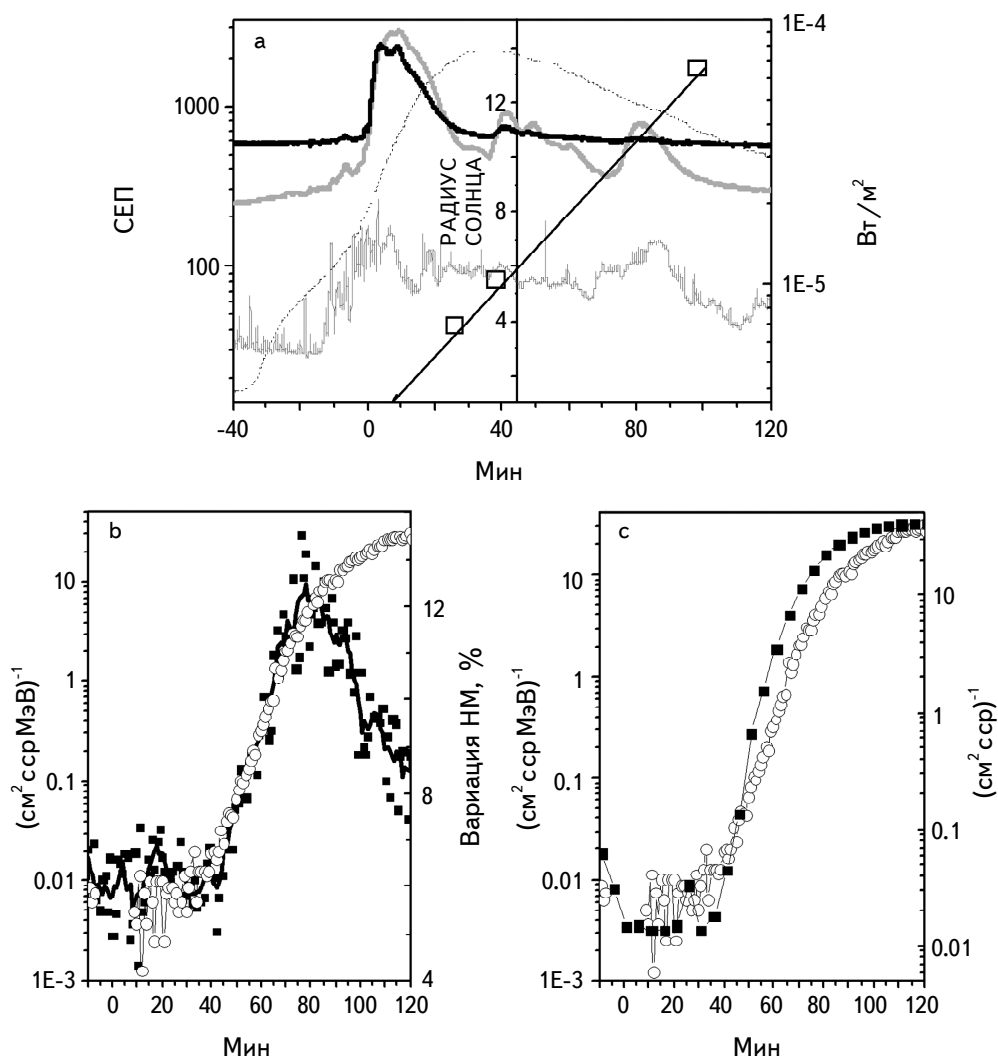


Рис.1. Событие 26 декабря 2001г. а - SXR GOES 1-8 Å (пунктир); поток радиоизлучения по данным RSTN на частотах 15.4 ГГц (черная кривая), 2695 МГц (светло-серая кривая) и 245 МГц (серая кривая); положение КВМ по данным LASCO/SOHO (открытые квадраты). б - вариация темпа счета НМ SOPO (черные квадраты) и поток электронов в канале 2.64-10.4 МэВ EPHIN/SOHO (открытые кружки); с - поток протонов GOES >100 МэВ (черные квадраты) и поток электронов в канале 2.64-10.4 МэВ EPHIN/SOHO (открытые кружки).

Ускорение и выход протонов >500 МэВ в МП длились около 40 мин (рис.1б), при этом протоны >100 МэВ и электроны ускорялись значительно дольше (рис.1с). Время появления энергичных протонов около Земли позволяет считать, что вторая - протонная фаза вспышки началась до +10 мин.

Настоящей энциклопедией по этому событию является цикл статей [12-14],

и наш анализ не противоречит их основным выводам. Отметим, что совпадение нашей оценки времени выхода протонов >100 МэВ 05:30 UT (+26 мин) с оценкой в работе [19] $05:29:00 \text{ UTC} \pm 3.7 \text{ мин}$ ($+25 \pm 3.7$) по методу анализа дисперсии скоростей является случайностью. Этот метод основан на предположении, что частицы выходят на благоприятную силовую линию межпланетного магнитного поля одновременно, которое не выполняется в этом событии.

Это иллюстрирует рис.2, где показаны потоки электронов в дифференциальных каналах SOHO/EPHIN за вычетом фона. Отлично видно, что потоки электронов меньших энергий превысили фоновый уровень детектора SOHO/EPHIN заведомо раньше, чем больших (на +15, +25 и +35 мин), т.е. они были инжектированы в МП раньше (на +11, +22 и +33 мин). Это возможно в том случае, если процесс ускорения был длительным, что приводило к постепенному росту потока электронов разных энергий.

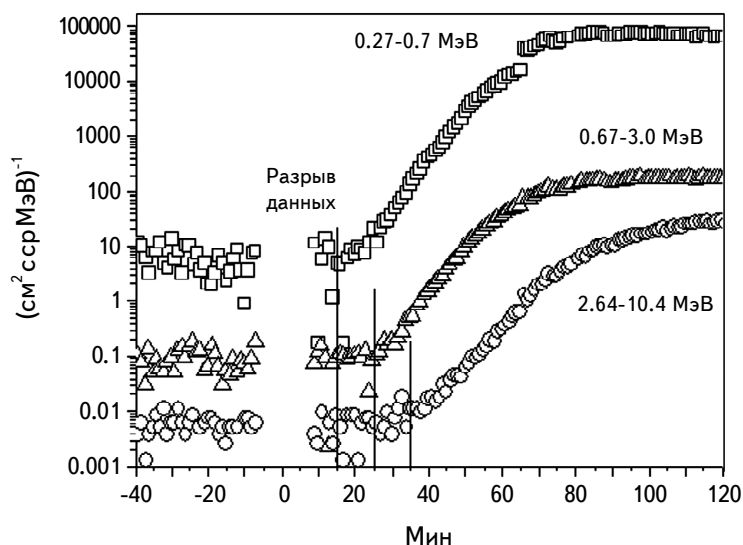


Рис.2. Поток электронов в каналах 0.27-0.7, 0.67-3.0 и 2.64-10.4 МэВ EPHIN/SOHO (вычтен фон 65.5, 0.34 и 0.0012 $(\text{см}^2 \text{ с ср МэВ})^{-1}$).

В событиях 2 ноября 2003г. (рис.3b, c) и 9 августа 2011г. (рис.4b, c) в МП, по всей видимости, наблюдались электроны от первой фазы. Качество данных SOHO/EPHIN не позволяет провести анализ времени первого прихода электронов разных энергий. Однако в этих событиях доступны отличные данные RHESSI и ACS SPI по солнечному HXR излучению [15-16], которые показывают взаимодействие высокоэнергичных электронов в атмосфере Солнца и дают возможность оценить длину их пути до детектора EPHIN.

Обсудим вспышку 2 ноября 2003г. по данным наблюдений SXR и

радиоизлучения (рис.3а). Нетепловое НХР [15] и радиоизлучение наблюдались до нулевого времени, хромосферное испарение началось вблизи нулевого времени (рост SXR), а вспышка достигла короны только к +5 мин (начало на 245 МГц). Эти излучения обязаны электронам, ускоренным до $E_e < 100 - 300$ кэВ. Отметим, что именно на +5 мин начались радиоизлучения II и IV типов, а время зарождения KBM на 1 радиусе Солнца по аппроксимации LASCO

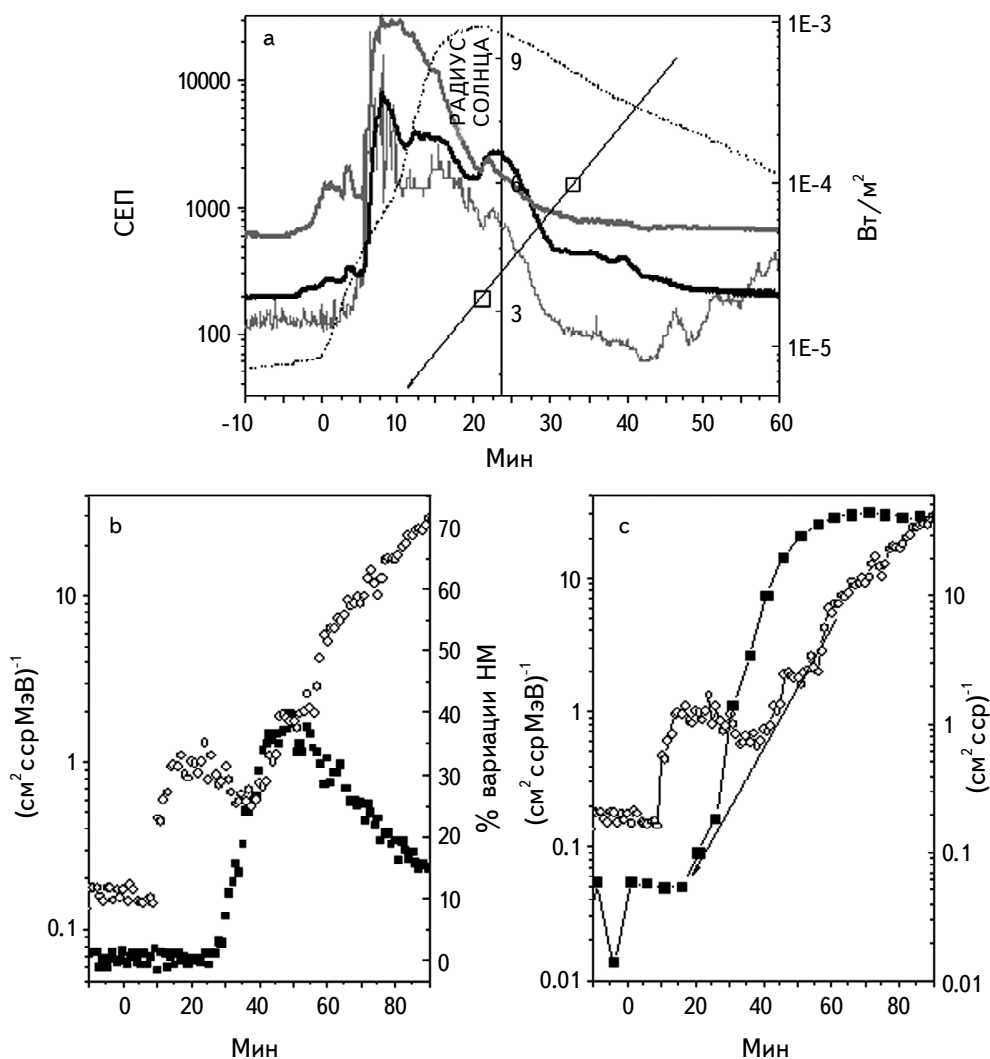


Рис.3. Событие 2 ноября 2003г. а - SXR GOES 1-8 Å (пунктир); поток радиоизлучения по данным RSTN на частотах 15.4 ГГц (черная кривая), 2695 МГц (светло-серая кривая) и 245 МГц (серая кривая); положение KBM по данным LASCO/SOHO. б - вариация темпа счета НМ SOHO (черные квадраты) и поток электронов в канале 2.64-10.4 МэВ EPHIN/SOHO (открытые кружки); с - потоки протонов GOES >100 МэВ (черные квадраты) и электронов в канале 2.64-10.4 МэВ EPHIN/SOHO (открытые кружки).

соответствует примерно +10 мин (без учета возможного ускорения КВМ).

Согласно интерпретации [15], генерация π_0 -мезонов началась после +5 мин. Релятивистских электронов в количестве (аналогия с первой фазой вспышки M7.1 26 декабря 2001г.), достаточном для их последующей регистрации EPHIN, не было на Солнце до +5 мин. Электроны первой фазы пришли не позднее

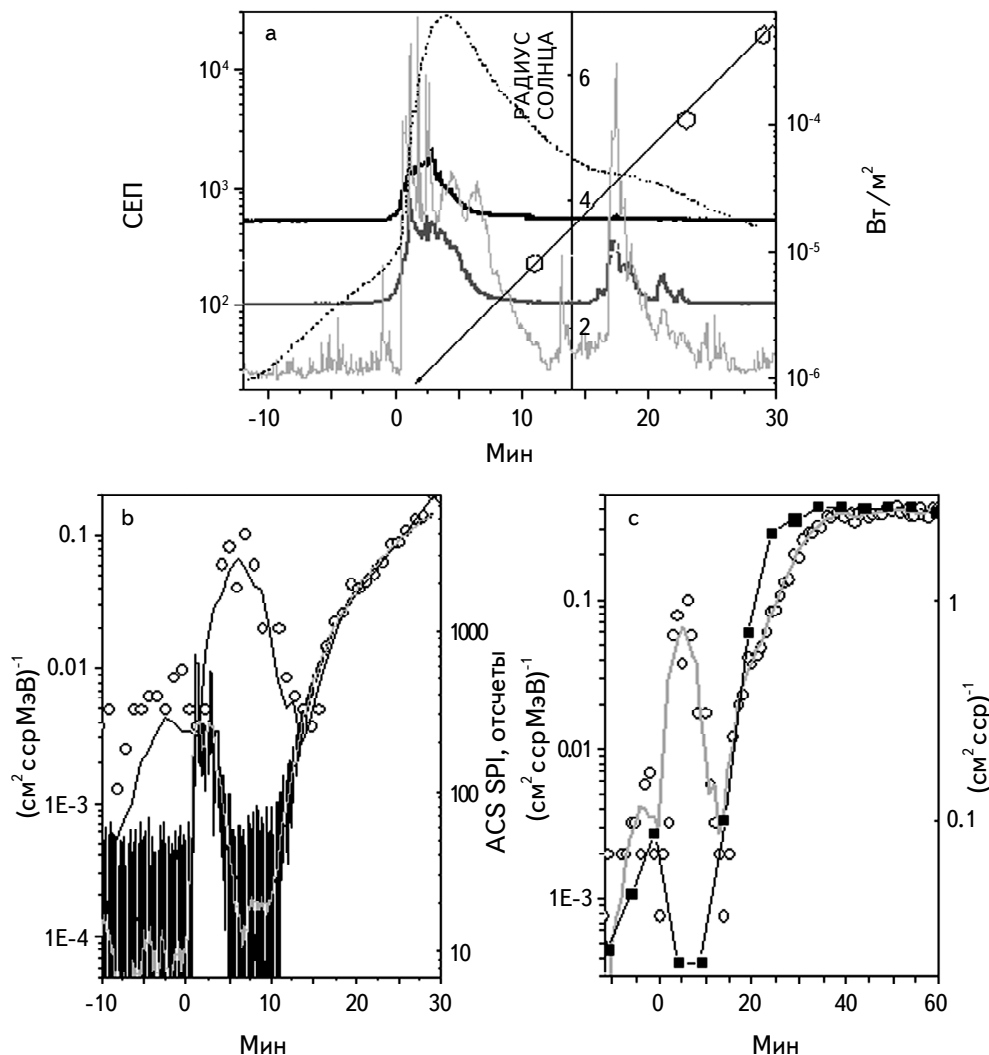


Рис.4. Событие 9 августа 2011г. а - SXR GOES 1-8 Å (пунктир); поток радиоизлучения по данным RSTN на частотах 15.4 ГГц (черная кривая), 2695 МГц (светло-серая кривая) и 245 МГц (серая кривая); положение КВМ по данным LASCO SOHO (открытые шестиугольники). б - темп счета ACS SPI (сглаженные средние за 1 с (20 точек) - черная кривая и за 1 мин (1200 точек) - светло-серая кривая) и поток электронов в канале 2.64-10.4 МэВ EPHIN/SOHO (открытые кружки); с - потоки протонов GOES >100 МэВ (черные квадраты) и электронов в канале 2.64-10.4 МэВ EPHIN/SOHO (открытые кружки).

+10 мин (рис.3b, c), т.е время распространения от Солнца $8+5=13$ мин, а длина пройденного пути была 1.6 а.е.

Время распространения до Земли протонов 30, 100 и 500 МэВ будет соответственно 52, 30 и 17 мин. Таким образом, ожидаемое время начала GLE +22 мин, а наблюдалось оно на +25 мин (рис.3b), Временные профили потоков электронов и протонов были подобными примерно с +35 мин до +55 мин (рис.3b). Если протоны 30 и 100 МэВ были ускорены к моменту начала радиоизлучения на 15.4 ГГц, то их ожидаемое время прихода не ранее +48 и +26 мин. Более раннее возрастание в интегральном канале >100 МэВ (рис.3c), скорее всего, вызвано протонами больших энергий.

Обсудим вспышку 9 августа 2011г. по SXR и радионаблюдениям (рис.4а). Вспышка началась с SXR излучения на -5 мин и, возможно, была связана с ускорением электронов с энергией <100 кэВ в верхней хромосфере. К нулевому моменту времени величины энергии и количества ускоренных электронов стали достаточными для генерации радиоизлучения на 15.4 ГГц и HXR >150 кэВ (ACS SPI), начала хромосферного испарения (рост SXR). Вспышка охватывала высоты от хромосферы (HXR) до короны (начало 245 МГц на -1 мин). Судя по радиоизлучению II типа (начало на 0 мин) и аппроксимации данных LASCO, KBM произошел в промежутке между 0 и +3 мин.

Наблюдения электронов и протонов вблизи Земли показаны на рис.4b, c. Электроны первой фазы пришли не позднее +3 мин (рис.4b, c), т.е. время их распространения от Солнца было 11 мин, а длина пройденного пути до Земли составляет 1.4 а.е. Время запаздывания протонов 30, 100 и 500 МэВ ($V/c = 0.25, 0.43$ и 0.76) относительно ЭМИ при пройденном пути 1.4 а.е. будет соответственно 36, 18 и 6 мин. Наблюдаемое начало протонного возрастания ACS SPI +10 мин, т.е. время выхода первых протонов, зарегистрированных на Земле, +4 мин на рис.4а. Временные профили потока электронов и темпа счета ACS SPI подобны с +13 мин до +30 мин (рис.4b). Ожидаемое время прихода протонов 30 и 100 МэВ при условии их появления на Солнце вместе с 15.4 ГГц - не ранее 36 и 18 мин. Более раннее возрастание в интегральном канале >100 МэВ (рис.4c), скорее всего, вызвано протонами больших энергий. Первая фаза вспышки продолжалась до нулевого времени.

4. *Обсуждение и выводы.* Во вспышках 26 декабря 2001г. (M7.1), 2 ноября 2003г. (X8.3) и 9 августа 2011г. (X6.9) выделены первая и вторая фазы вспышки, причем в межпланетной среде наблюдались электроны и протоны от второй фазы всех вспышек, а электроны от первой фазы - только в двух последних.

К началу импульсной фазы релятивистские электроны и протоны с энергиями ~30 МэВ, доступными для наблюдения, уже были ускорены в

атмосфере Солнца. Релятивистские электроны и протоны инжектировались в МП на постэруптивной фазе этих событий более 25 мин, причем длительность инжекции увеличивалась с уменьшением энергии.

Временные профили электронов и протонов от второй фазы подобны, что свидетельствует об одинаковом механизме их ускорения и распространения. Задержка времени между приходом электронов первой фазы и приходом протонов второй является характерным временем ускорения релятивистских протонов.

Длительная инжекция может быть результатом либо длительного ускорения, либо захвата. Так как временные профили потоков протонов подобны временным профилям электронов, а их длительный захват невозможен [20], то имело место их длительное ускорение [21,22].

Длительное ускорение протонов возможно или на постэруптивной фазе вспышки, или на ударной волне КВМ [23]. Поскольку релятивистские электроны вряд ли могли быть ускорены на ударной волне [10], то было реализовано длительное ускорение на постэруптивной фазе. В работе [21] предложено, что именно стохастическое ускорение естественным образом описывает явления на постэруптивной фазе. Отметим, что автор [24], уверенный в ускорении протонов ударными волнами, пользуясь той же логикой, делает вывод о возможности ускорения электронов до релятивистских энергий на ударной волне в постепенных событиях.

Таким образом, рассмотренные наблюдения вспышек 26 декабря 2001г., 2 ноября 2003г. и 9 августа 2011г. на разных длинах волн и полученные соотношения между временами инжекции протонов и электронов в МП согласуются со сценарием стохастического механизма ускорения, предложенного в [7].

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) и признательны анонимному рецензенту за конструктивную критику.

Работа А.Б.Струминского и А.М.Садовского (ИКИ РАН) осуществлялась за счет субсидии программы "Плазма"; И.Ю.Григорьевой (ГАО РАН) выполнена по программе "Энерговыделение".

¹ Институт космических исследований РАН, Москва, e-mail: astrum@iki.rssi.ru

² Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, СПб

³ МГУ им. М.В.Ломоносова, НИИ ядерной физики им. Д.В.Скобелевца, Москва, Россия

TWO PHASES OF SOLAR FLARES AND STOCHASTIC ACCELERATION MECHANISM OF ELECTRONS AND PROTONS

A.B.STRUMINSKY¹, I.Yu.GRIGORIEVA², Yu.I.LOGACHEV³,
A.M.SADOVSKI¹

The hypothesis of the realization of two phases of charged particle acceleration in solar flares is well known, when subrelativistic electrons are accelerated in the first phase and relativistic electrons and protons in the second phase. In the solar proton events and their parent flares on December 26, 2001 (M7.1), November 2, 2003 (X8.3) and August 9, 2011 (X6.9), the first and second phases of the flare were separated, moreover, in the interplanetary medium only electrons were observed from the first phase, and electrons and protons from the second one. The time profiles of electrons and protons from the second phase are similar. Hence the conclusion is drawn about the predominant acceleration of relativistic electrons and protons observed in the interplanetary medium, in flares, and not on the shock front of the coronal mass ejection. Most likely, a stochastic acceleration mechanism is realized in flares, in which protons and electrons acquire energy in many elementary events throughout the duration of the flare, and its duration is much longer than the duration of an elementary act. To coordinate the stochastic process of acceleration and the existence of two phases in solar flares, it is necessary to take into account the gyrosynchrotron radiation losses of electrons in the second phase, which can be neglected in the first phase. The energy of accelerated protons in the first phase is small for their detection by processes taking place on the Sun, but in the second phase it can reach values sufficient for the appearance of gamma lines - nuclear and from the decay of pions.

Keywords: solar flares: X-ray and radio emission: coronal mass ejection: acceleration of solar protons and electrons: solar electronic and proton events

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Б.Струминский, Изв. РАН. Сер. физич., **83**, 597, 2019, (Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, **83**, 538, 2019).
2. И.Ю.Григорьева, А.Б.Струминский, Труды XXII Всерос. конф. по физике Солнца "Солнечная и солнечно-земная физика-2018" Ред. А.В.Степанов и Ю.А.Наговицын. СПб: ГАО РАН, 123, 2018.

3. *И.Ю.Григорьева, А.Б.Струминский*, Труды XXII Всерос. конф. по физике Солнца "Солнечная и солнечно-земная физика-2018", Ред. А.В.Степанов и Ю.А.Наговицын, СПб., ГАО РАН, 127, 2018.
4. *J.P.Wild, S.F.Smerd, A.A.Weiss*, Ann. Rev., Astron. Astrophys., **1**, 291, 1963.
5. *R.Ramaty, S.A.Colgate, G.A.Dulk et al.*, Proc. of the 2nd SKYLAB Workshop on Solar Flares., 117, 1978.
6. *A.Y.Shih, R.P.Lin, D.M.Smith*, Astrophys. J., **698**, 152, 2009.
7. *А.Б.Струминский, И.Ю.Григорьева, Ю.И.Логачев и др.*, Физика Плазмы, **2**, 1, 2020, (Plasma Phys. Rep., **46**, 174, 2020).
8. *A.Benz*, Solar Phys., **96**, 357, 1985.
9. *L.Vlahos*, Solar Phys., **121**, 431, 1989.
10. *J.A.Miller, P.J.Cargill, A.Emslie et al.*, J. Geophys. Res., **102**, 14631, 1997.
11. *Z.Svestka*, Solar Phys., **13**, 471, 1970.
12. *V.V.Grechnev, A.A.Kochanov*, Solar Phys., **291**, 3705, 2016.
13. *V.V.Grechnev, A.M.Uralov, V.I.Kiselev et al.*, Solar Phys., **292**, 3, 2017.
14. *V.V.Grechnev, V.I.Kiselev, A.M.Uralov et al.*, Solar Phys., **292**, 102, 2017.
15. *A.B.Struminsky*, Geomagnetism Aeronomy, **53**, 843, 2013.
16. *И.Н.Шарыкин, А.Б.Струминский, И.В.Зимовец*, Письма в Астрон. ж., **41**, 57, 2015, (Astron. Lett., **41**, 53, 2015).
17. *E.W.Cliver, S.W.Kahler, M.A.Shea et al.*, Astrophys. J., **260**, 362, 1982.
18. *A.B.Struminsky, I.V.Zimovets*, 21st ECRS, Kosice, Slovakia, Slovak Academy of Sciences, 237, 2009.
19. *D.V.Reames*, Astrophys. J., **706**, 844, 2009.
20. *Е.И.Дайбог, В.Г.Столповский, В.Ф.Мельников и др.*, Письма в Астрон. ж., **15**, 991, 1989, (Soviet Astron. Lett., **15**, 432, 1989).
21. *L.G.Kocharov, G.A.Kovaltsov, G.E.Kocharov et al.*, Solar Phys., **150**, 267, 1994.
22. *V.V.Akimov, P.Ambroz, A.V.Belov*, Solar Phys., **166**, 107, 1996.
23. *M.J.Aschwanden*, Space Sci. Rev., **171**, 3, 2012.
24. *S.W.Kahler*, Space Sci. Rev., **129**, 359, 2007.