

КОРОНАЛЬНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОНОВ ВО ВРЕМЯ И ПОСЛЕ ИХ СТОХАСТИЧЕСКОГО УСКОРЕНИЯ

© 2023 г. И. Ю. Григорьева^{1, *}, А. Б. Струминский², Ю. И. Логачев³, А. М. Садовский²

¹Главная астрономическая обсерватория Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

²Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

³Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына,
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*irina.2014.irina@mail.ru

Поступила в редакцию 06.10.2022 г.

После доработки 08.12.2022 г.

Принята к публикации 12.12.2022 г.

В эруптивных вспышках солнечные протоны стохастически ускоряются в широком телесном угле, далее эффективно удерживаются за расширяющимся фронтом коронального выброса массы (КВМ), который может как приносить протоны на силовую линию, идущую к удаленному наблюдателю, так и уносить их от нее. Рассматриваются 13 солнечных протонных событий 24-го цикла, в которых были зарегистрированы протоны с энергией (E) > 100 МэВ и которые сопровождалась регистрацией солнечного жесткого рентгеновского (HXR) излучения с $E > 100$ кэВ детектором ACS SPI и γ -излучения с $E > 100$ МэВ – телескопом FermiLAT, с источником на западной полусфере Солнца. Первый приход солнечных протонов на орбиту Земли определялся в каждом событии по значимому “протонному” превышению над фоном ACS SPI во время или после HXR всплеска. Все события рассматривались относительно выбранного нами нулевого времени (0 мин) родительских вспышек. “Ранний” приход протонов на орбиту Земли (<+20 мин), наблюдавшийся в 4 событиях, соответствует “быстрому” ускорению электронов (10 МэВ/с). “Поздний” приход протонов (>+20 мин) соответствует “медленному” ускорению электронов (1 МэВ/с) и наблюдался в шести событиях. В трех событиях наблюдался “задержанный” приход протонов (>+30 мин), когда распространение КВМ ухудшало магнитное соединение источника с наблюдателем. Направление распространения КВМ характеризуется в каталоге (SOHO LASCO CME Catalog) позиционным углом (PA – Position Angle). Наблюдаемый угол PA систематизирует времена первого прихода протонов и темп роста их интенсивности. Параметр PA необходимо учитывать при анализе протонных событий.

DOI: 10.31857/S0023420622600246, EDN: BVHXGS

ВВЕДЕНИЕ

Момент наблюдения прихода первых солнечных протонов (СП) на орбите Земли – один из ключевых параметров солнечного протонного события (СПС), который позволяет оценивать (в рамках той или иной модели распространения протонов в межпланетном пространстве) первый момент их выхода из источника вблизи Солнца на силовую линию, соединяющую источник с наблюдателем. Зная момент и место выхода протонов из источника, можно делать выбор в пользу того или иного механизма ускорения СП. Источником СП мы называем поверхность, пересекая которую, протоны начинают распространяться по силовым линиям спирали Паркера в солнечном ветре. В моделях распространения источников солнечных космических лучей (СКЛ) описывается функцией инжекции $J(R, \Theta, \phi, E, t)$, которая задает количество частиц, выходящих с единич-

ной поверхности в точке R в телесный угол (Θ, ϕ) в диапазоне энергий dE за единицу времени dt . Источник СКЛ – результат процессов ускорения и распространения частиц в короне Солнца. Наблюдательные данные показывают, что источник СКЛ длительный и распределенный в пространстве.

В настоящее время существуют два различных взгляда на области ускорения СП (например, [1–4]): нижняя корона во вспышках или высоко в короне на ударной волне коронального выброса массы (КВМ). Различные процессы ускорения предполагают и различные способы распространения в короне, т.е. различные свойства источников (функций инжекции). Аргументом в пользу ускорения на ударной волне КВМ считается поздний выход СП на нужную силовую линию относительно времени вспышки [5–7] и большое угловое расстояние между положением вспышки и

основанием благоприятной силовой линии или местом генерации γ -излучения в залимбовых вспышках, например, как 29 сентября 1989 г. [8]. Для объяснения этих же наблюдательных фактов в случае ускорения СП во вспышках, чьи характерные времена и угловые размеры считались малыми, привлекалась гипотеза о корональном распространении СП [9] и гипотеза о длительном ускорении или захвате СП на постэруптивной фазе вспышек [3, 10].

До первых наблюдений FermiLAT γ -излучения с $E > 100$ МэВ изображения возможного источника СП были недоступны. Наблюдения FermiLAT [11–13] показали длительное γ -излучение с $E > 100$ МэВ, выходящее непосредственно из области вспышки, которое свидетельствовало о взаимодействии СП с образованием π_0 -мезонов в атмосфере Солнца. Такая локализация γ -источников стала дополнительным аргументом в пользу ускорения СП во вспышках. Однако последующие наблюдения γ -излучения с $E > 100$ МэВ от залимбовых вспышек FermiLAT [14], когда угловое расстояние между вспышкой и источником γ -излучения было больше 40° (аналогично работе [8]), вновь поставили под сомнение вспышечное происхождение СП [15, 16].

Отдельный класс СПС составляют события, сопровождающиеся наземным возрастанием (Ground Level Enhancement – GLE) интенсивности вторичных КЛ, регистрируемых в нижних слоях атмосферы Земли. Каскад КЛ может быть зарегистрирован на поверхности Земли, если энергия первичного нуклона превышает ~ 400 МэВ (порог атмосферного обрезания), а средняя энергия солнечных протонов в спектре > 1 ГэВ. Так как эффекты распространения минимальны при больших энергиях СП, то считается, что начало GLE наиболее точно показывает момент выхода протонов из источника в межпланетное пространство (МП) (по оценкам [4] ошибка времени распространения СП ± 1 мин). Порог атмосферного обрезания лишь незначительно превышает $E = 266$ МэВ – пороговую энергию генерации π_0 -мезонов. Поэтому случаи регистрации γ -излучения с $E > 100$ МэВ (FermiLAT) и GLE события должны коррелировать друг с другом, если одна и та же популяция частиц взаимодействует на Солнце и в атмосфере Земли, т.е. при благоприятных условиях распространения и одном механизме ускорения.

Максимумы γ -излучения с $E > 100$ МэВ, зарегистрированные FermiLAT, с точностью до нескольких секунд совпадают с максимумами HXR излучения в диапазоне энергий 100–300 кэВ, зарегистрированными FermiGBM. Это совпадение предполагает единый процесс ускорения и распространения как ионов (протонов), так и электронов [13]. Также оказалось, что временные профили электронов и протонов с сопоставимыми

релятивистскими факторами (отношение скорости частицы к скорости света V/c) подобны [17, 18], а релятивистские электроны с $E \sim 10$ МэВ ускорить ударными волнами невозможно [19]. Из сказанного выше следует, что ускорение протонов на ударных волнах КВМ не может являться преобладающим механизмом набора энергии [17, 18], иначе события GLE наблюдались бы гораздо чаще.

По нашему мнению, солнечные электроны с $E > 1$ МэВ и протоны с $E > 100$ МэВ ускоряются стохастически (во множестве элементарных актов с характерными временами много меньше всего процесса ускорения) в эруптивных вспышках длительностью более 10 мин на фоне ускорения КВМ (времени наибольшего энерговыделения) [20]. Началом ускорения КВМ можно считать начало роста меры эмиссии при наличии радиоизлучения на частотах ниже 1415 МГц [21, 22].

Традиционный подход к поиску механизма ускорения заключается в следующем: зная момент и место выхода протонов из источника, можно сделать выбор в пользу того или иного механизма ускорения СП [4]. С другой стороны, задав определенные (физически обоснованные) свойства процесса ускорения на Солнце, можно искать подтверждение выбранному процессу ускорения в наблюдениях СКЛ в МП и конкретизировать детали процессов распространения в короне и в МП. Именно такой подход используется в нашей работе.

СВОЙСТВА ИСТОЧНИКА СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОНОВ ПРИ СТОХАСТИЧЕСКОМ УСКОРЕНИИ

На рис. 1 показана примерная схема развития эруптивной вспышки в нашем представлении с обозначением характерных высот. Максимальный угловой размер системы петель – размер максимального задействованного магнитного диполя в ходе вспышки (при последовательном вовлечении во вспышечный процесс различного размера диполей от меньших к большим). В этом случае ускоренные частицы легко заполняют все большой телесный угол, что и представляет собой корональное распространение при стохастическом ускорении.

В основе работы [17] лежит идея, что одновременное ускорение электронов и протонов не должно нарушать условие электронейтральности плазмы, поэтому количество электронов и протонов, ускоренных до одинаковых скоростей, должно быть сопоставимо. В этом случае “протонная” вспышка (появление взаимодействующих протонов с $E > 10$ МэВ) должна начинаться при электронной температуре плазмы ~ 17 МК (протоны с $E \sim 3$ МэВ эквивалентны по скоростям электронам с $E \sim 1.5$ кэВ), а начало генерации π_0 -мезонов

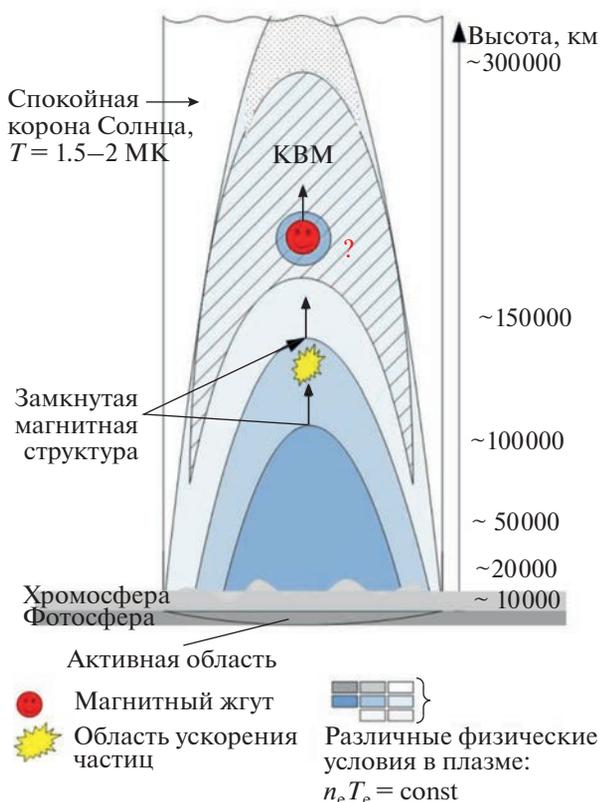


Рис. 1. Схема развития эруптивной вспышки по нашим представлениям.

будет возможно при энергии электронов ~ 150 кэВ (протоны с $E \sim 300$ МэВ эквивалентны по скоростям электронам с $E \sim 150$ кэВ), т.е. на фоне НХР излучения с $E > 100$ кэВ.

Существуют наблюдательные данные, которые показывают время ускорения электронов до кинетической энергии ~ 100 кэВ порядка ~ 400 мс [19]. Также наблюдаются задержки между НХР всплесками на различных энергиях электронов (20, 50, 100, 200 и 300 кэВ) порядка десятков миллисекунд, которые могут быть обусловлены временем ускорения (см. обзор [23] и ссылки там). Поэтому время, необходимое для набора $E \sim 200$ МэВ протонами, будет ~ 1 мин при ускорении электронов до кинетической энергии ~ 100 кэВ за 40 мс (“быстрое” ускорение) или ~ 10 мин при ускорении электронов до ~ 100 кэВ за 400 мс (“медленное” ускорение). Если за ноль времени в солнечных событиях принять начало микроволнового излучения 8.8–15.4 ГГц (оно обычно совпадает с появлением значимого сигнала НХР излучения с $E \sim 100$ кэВ), то ожидаемое время прихода протонов с $E \sim 200$ МэВ ($V/c = 0.57$) на орбиту Земли будет ~ 11 мин (~ 21 мин, соответственно) при распространении без рассеяния по спирали Паркера до Земли (1.3 а.е., скорость солнечного ветра

300 км/с). Таким образом, неопределенность характерного времени ускорения солнечных электронов до $E \sim 100$ кэВ определяет неопределенность времени первого прихода СП с $E \sim 200$ МэВ на орбиту Земли и составляет порядка 10 мин.

Также при регистрации первого прихода СП детекторами, интегральными по энергии, существует неопределенность времени первого прихода СП, связанная с дисперсией по скоростям. Оценим максимальное время ускорения протонов от $E \sim 100$ до ~ 500 МэВ, которое позволит протонам с $E \sim 500$ МэВ ($V/c = 0.75$) прийти раньше протонов с $E \sim 100$ МэВ ($V/c = 0.43$). При распространении без рассеяния по спирали Паркера до Земли (1.3 а.е., скорость солнечного ветра 300 км/с) время распространения протонов с $E \sim 500$ МэВ ($V/c = 0.75$) составит ~ 15 мин, а для протонов с $E \sim 100$ МэВ ($V/c = 0.43$) будет ~ 25 мин. Таким образом, максимальное время ускорения протонов с E от ~ 100 до ~ 500 МэВ должно быть менее ~ 10 мин, чтобы дисперсия по скоростям не наблюдалась.

Эти оценки обуславливают выбор нулевого времени для анализа явлений, связанных с солнечными вспышками, а также критерии “раннего” ($< +20$ мин) и “позднего” ($> +20$ мин) прихода СП на орбиту Земли, относительно нулевого времени. В случае “быстрого” режима ускорения электронов и протонов первые СП с $E > 100$ МэВ будут наблюдаться на Земле через 10 мин после выбранного нами нуля (возможно, одновременно или позднее протонов с $E > 500$ МэВ). В случае же “медленного” режима ускорения электронов и протонов первые СП с $E > 100$ МэВ будут наблюдаться на Земле через 20 мин. Оба варианта потенциально могут сопровождаться GLE, но в разное время относительно выбранного нуля.

Оценкой области ускорения протонов (углового размера ϕ – источника γ -излучения с $E > 100$ МэВ) будет $\phi \approx 2 \arccos(R_0^{-1})$ примерно 49° – 74° , где $R_0 = (1.1 - 1.25) R_S$ – гелиоцентрическое расстояние до максимальной высоты развития вспышечного события (точки отрыва КВМ), а R_S – солнечный радиус. Действительно, GLE события наблюдаются в диапазоне широт $\pm 30^\circ$ от экватора [24], что, по-видимому, соответствует высоте источника протонов $H \sim 0.15 R_S \sim 110$ Мм. Эти оценки совпадают с результатами статистического анализа [25], который показал, что долготное распределение GLE событий аппроксимируется гауссианой в диапазоне долгот от $\sim E90^\circ$ до $\sim W150^\circ$ с максимумом на $\sim W60^\circ$, что практически совпадает с номинальным положением основания благоприятной силовой линии $\sim W55^\circ$ в спокойном солнечном ветре.

Традиционно такие распределенные в пространстве источники связывают с ускорением на ударных волнах КВМ, а не ускорением частиц в

магнитосфере активной области, где происходит интенсивное энерговыделение (множественное пересоединение), сопровождающееся ускорением КВМ. Как в случае ускорения ударными волнами, так и при стохастическом ускорении во вспышках, протоны удерживаются за фронтом КВМ, а размер источника СП увеличивается по мере ускорения КВМ, но природа ускорения различна [17, 18, 20]. В любом сценарии корональное распространение СКЛ представляет собой результат увеличения телесного угла фронта КВМ в мощных эруптивных вспышках (формирование КВМ типа Halo). Развитие нашей гипотезы происхождения СП заключается в том, что КВМ способен как приносить ускоренные протоны на силовую линию, идущую к наблюдателю, так и уносить их от нее. В этом случае важным становится направление распространения КВМ, характеризуемое параметром PA (Position Angle), измеряемым от направления на север против часовой стрелки. КВМ распространяется в плоскости эклиптики западной полусферы Солнца при PA ~ 270°. Значения угла, отличные от этого, ухудшают условия распространения СП.

Наблюдаемая задержка первого прихода СП, относительно приведенных выше оценок, и медленный рост их интенсивности соответствуют позднему пересечению благоприятной силовой линии областью источников протонов и затрудненному доступу к ней в дальнейшем (переносу СП поперек силовых линий). При этом нужно говорить как о долготном, так и о широтном корональном распространении КВМ и СП. Время первой регистрации СП зависит от величины фонового счета детектора и скорости роста интенсивности потока протонов в точке наблюдения. Поздний приход и медленный рост интенсивности могут быть вызваны одной и той же причиной — наличием препятствий для выхода частиц на благоприятную силовую линию. Этим препятствием может быть фронт КВМ.

Рассматривая различные протонные события, сопровождавшиеся регистрацией FermiLAT γ -излучения с $E > 100$ МэВ [26], легко найти случаи, в которых моменты первого прихода СП относительно момента начала ускорения КВМ значительно различаются при практически одинаковом расположении родительских вспышек относительно Земли, с учетом возможной ширины источника СП. При этом, судя по видеороликам коронографа LASCO в открытом доступе, ранний приход СП соответствует начальному распространению КВМ в плоскости эклиптики, а их задержанный приход — начальному распространению КВМ вне плоскости эклиптики. Кроме того, мы учитываем влияние положения вспышки на солнечном диске, направления распространения КВМ во время первого прихода СП на орбиту Земли и скорость роста их интенсивности в выбранных событиях.

ИСТРУМЕНТЫ И ОТБОР СОБЫТИЙ

Мы рассмотрели список событий из работы [28]. Для изучения отобраны все 13 СПС 24-го цикла солнечной активности из западной полусферы Солнца, в которых были зарегистрированы протоны с $E > 100$ МэВ, чьи родительские вспышки сопровождались γ -излучением с $E > 100$ МэВ [26–28]. Выводы, сделанные в нашей работе на основе 13 событий 24-го цикла, мы проверяем на примерах последнего GLE события 23-го цикла (13 декабря 2006 г. [29, 30]) и первого GLE события текущего 25-го цикла (28 октября 2021 г. [31, 32]). Большинство выбранных нами событий были предметом исследования и других авторов, но агитирующих за ускорение СП ударной волной КВМ, например, [16, 33, 34].

Основные характеристики событий относительно нулевого времени приведены в таблице, солнечные данные взяты из файлов YYYYMMDDevents.txt (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/NOAA/org_events_text/). В итоге в отобранные события для исследования попали: два единственных GLE события 24-го цикла (71-е — 17 мая 2012 г. [20, 27, 33, 34] и 72-е — 10 сентября 2017 г. [17, 35, 36]); восемь событий, связанных с известными вспышками или СПС (M3.7 — 7 марта 2011 г. [11, 13, 21], M2.5 — 6 июня 2011 г. [11, 13], X6.8 — 9 августа 2011 г. [18, 20, 22, 33, 34], X1.7 27 января 2012 г. [33, 34], X1.1 6 июля 2012 г. [33, 34], 6 января 2014 г. [14, 37] и 7 января 2014 г. [38] и X9.3 6 сентября 2017 г. [17, 21, 28], по одному событию из 23-го и 25-го циклов и три малоизвестных СПС из 24-го цикла (одно из них — событие 25 июня 2015 г. [28], которого нет ни на одном графике, так как начало протонного возрастания было позднее +60 мин). Все события анализируются относительно выбранного нулевого времени — начала микроволнового радиоизлучения на частотах 8.8 или 15.4 ГГц, как это было сделано нами, например, в [17, 18, 20, 21]. В отсутствие данных на этих частотах за ноль берутся другие из имеющихся данных, например, для залимбового события 6 января 2014 г. взято начало радиоизлучения II типа. Для события 28 октября 2021 г., в котором микроволновое излучение, по всей видимости, не превысило пороговой интенсивности регистрации (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/NOAA/org_events_text/), за ноль времени выбрано начало радиоизлучения на 610–245 МГц.

Моментом первого прихода СП на орбиту Земли мы считаем начало значимого возрастания темпа счета антисовпадательной защиты спектрометра на КА *ИНТЕГРАЛ* (Anti-Coincidence Shield of Spectrometer on *INTEGRAL* — ACS SPI) на фоне или после всплеска солнечного HXR излучения [17, 18, 20, 21, 29]. Детектор ACS SPI регистрирует HXR излучение с $E > 100$ кэВ и протоны с $E > 100$ МэВ и представляет собой эффектив-

Таблица 1. Некоторые характеристики событий прихода солнечных протонов

№	А	Б	В, мин	Г, мин	Д, мин, км/с	Е, град	Ж <≈>
1	13.XII.2006 02.21 UT	S06W35 X3.4	+17.5	+28	+33/+57 1774/1869	193/192	S6<S77
2	7.III.2011 19.47 UT	N24W60 M3.7	>+45	Нет	+13/+25 2126/1845	315/311	N24<N45
3	7.VI.2011 06.25 UT	S21W54 M2.5	+20	Нет	+24/+31 1255/1655	238/247	S21<S32
4	4.VIII.2011 03.49 UT	N19W36 M9.3	+25	Нет	+23/+29 1316/1547	296/289	N19<N26
5	9.VIII.2011 08.01 UT	N17W69 X6.8	+10	Нет	+11/+23 1610/2202	279/279	N17>N9
6	6.IX.2011 22.20 UT	N14W18 X2.1	+26	Нет	+45/+52 575/908	295/286	N14<N25
7	27.I.2012 18.10 UT	N27W71 X1.7	+20	Нет	+17/+28 2505/1793	292/294	N27≈N22
8	17.V.2012 01.30 UT	N13W87 M5.1	+10	+13	+18/+30 1582/1757	268/264	N13>S02
9	6.VII.2012 23.03 UT	S17W50 X1.1	+20	Нет	+21/+27 1829/3278	237/227	S17<S33
10	6.I.2014 07.45 UT	S08W110 [14]	<+13	+13 [37]	+15/+27 1400/1757	261/267	S8≈S9
11	7.I.2014 18.05 UT	S15W11 X1.2	+45	Нет	+19/+31 1831/2234	231/231	S15<S39
12	25.VI.2015 08.12 UT	N09W42 M7.9	Нет	Нет	+24/+36 1627/2030	323/327	N9<N53
13	6.IX.2017 11.54 UT	S09W42 X9.3	+26	Нет	+30/+36 1569/2050	205/205	S9<S65
14	10.IX.2017 15.52 UT	S09W91 X8.2	+20	+16	+8/+14 3163/4061	260/260	S9≈S10
15	28.X.2021 15.27 UT	S26W05 X1.0	+20	+23	+21/+33 1520/1934	189/190	S26<S81

Примечание: полужирным начертанием выделены случаи раннего прихода СП (время первой регистрации протонов <+20 мин), остальное – случаи позднего прихода СП (время первой регистрации <+30 мин). А – дата и выбранное нулевое время; Б – координаты активной области и балл вспышки (*GOES*); В – начало протонного возрастания *ACS SPI*; Г – начало *GLE* события; Д – время первого и второго кадра КВМ (*SOHO LASCO*, минут после 0), средняя скорость и скорость первого появления КВМ (км/с); Е – позиционный угол КВМ (*PA*, град) на первом и втором кадрах (*SOHO LASCO*); Ж – сравнение широты солнечной вспышки и разности углов (*PA-270°*): < – КВМ ухудшает условия распространения, > – улучшает, ≈ – не изменяет.

ный, но не калиброванный детектор. Данные *ACS SPI* доступны на сайте (<https://isdc.unige.ch/~savchenk/spiacs-online/spiacsplc.pl>) с временным разрешением 50 мс. При одноминутном сглаживании и вычитании фона значимым становится темп счета *ACS SPI* менее 10 отсчетов за 50 мс. Детектор *ACS SPI* используется нами для исследования взаимосвязи солнечных вспышек и протонных событий.

Информация о КВМ взята из каталога *SOHO LASCO CME Catalog* (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/). В нашей таблице приведены времена 1-го и 2-го моментов регистрации положения КВМ (t_1 и t_2), его средняя скорость V_{cp} и скорость распространения от 1-го до 2-го зарегистрированного положения V_{12} , а также угол *PA* для этих моментов времени. Поля зрения коронографов

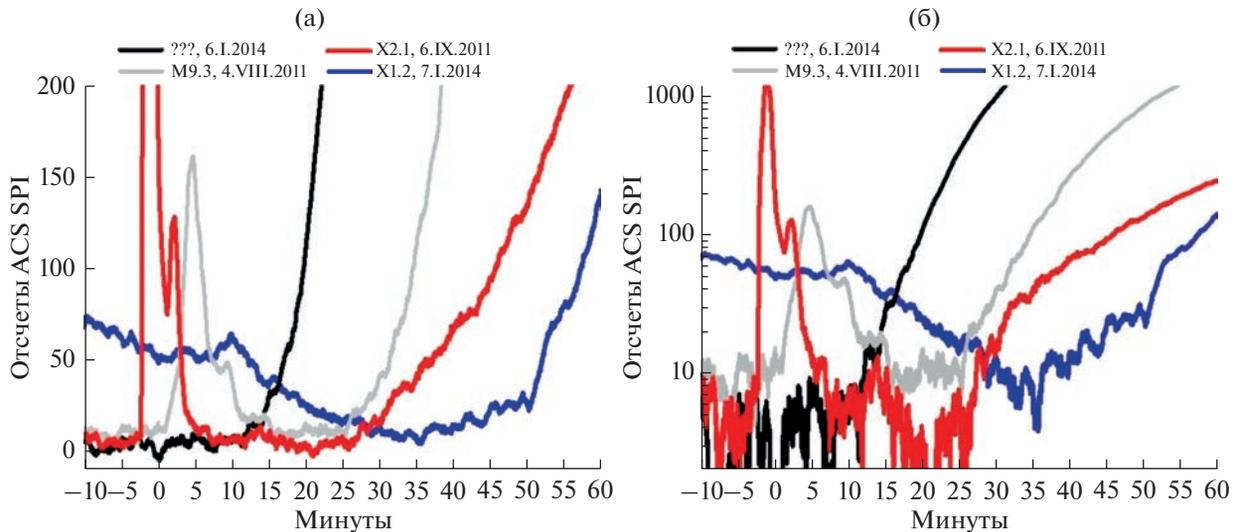


Рис. 2. Временные профили темпа счета ACS SPI за 50 мс (сглаженные средние за 1 мин, фон вычтен) в событиях 4, 6, 10 и 11 (согласно табл. 1). Панели (а) и (б) различаются вертикальным масштабом.

LASCO C2 и C3 перекрываются, но коронографы C2 и C3 делают кадры не одновременно, поэтому время между t_1 и t_2 может не совпадать со скважностью кадров 12 минут.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Разделение событий на “быстрые” и “медленные” по характеру роста интенсивности поясняется на рис. 2. Ранний приход протонов соответствует ожидаемому приходу протонов с $E \sim 200$ МэВ при распространении без рассеяния между +10 и +20 мин в случае “быстрого” ускорения. Залимбовое событие 6 января 2014 г. с наземным возрастанием на одном нейтронном мониторе (NM) – sub-GLE [37] показывает, что возможен “ранний” приход протонов на +13 мин при неблагоприятном расположении вспышки (необходимо преодолеть более 40° на восток по долготе для достижения благоприятной силовой линии). Поэтому, все возрастания протонов, чьи временные профили будут “правее” профиля протонного события 6 января 2014 г., мы считаем “медленными”, а “левее” считаем “быстрыми”.

Событие 7 января 2014 г. является примером “позднего” прихода и “медленного” роста интенсивности. Оно симметрично событию 6 января 2014 г. относительно благоприятной силовой линии источника (S15W11 – необходимо преодолеть более 44° на запад по долготе), но при этом КВМ распространяется в неблагоприятном направлении ($PA = 239^\circ$). Пара событий без GLE 4 августа 2011 г. и 6 сентября 2011 г. (при практически одинаковых координатах вспышек на диске и углах PA) показывает задержку прихода на ~ 5 мин относи-

тельно ожидаемого прихода на +20 мин (т.е. на +25 мин) – события с “медленным” ускорением. Также в этой паре временные профили отклика на приход протонов на ACS SPI повторяют друг друга примерно до +32 мин, позднее интенсивности СП в событии 4 августа стали расти быстрее, чем 6 сентября. Это, возможно, связано с различием темпов ускорения на постэруптивной фазе (скорость КВМ 6 сентября была минимальной из всей выборки событий).

На рис. 3 показаны временные профили ACS SPI для шести событий, условно разделенных на две группы по влиянию КВМ на распространение СП. Панель 3а акцентирует внимание на HXR излучении вспышек. Максимальные интенсивности HXR излучения различаются в разных вспышках более чем на два порядка, но временная динамика HXR излучения (т.е. вспышечного энерговыделения) в этих событиях схожа первые 6–8 мин. Этот отрезок времени, когда происходит “синергия” вспышек и КВМ [39], мы связываем со стохастическим ускорением релятивистских электронов и протонов с $E > 100$ МэВ и ускорением КВМ в нижней короне [17, 20–22]. Представления о “синергии” вспышек и КВМ, по-видимому, подтверждаются последними наблюдениями FermiLAT залимбовой вспышки 17 июля 2021 г. (S20E140), STIX на борту *Solar Orbiter* и *STEREO-A* (рис. 3 в [40]). Первые идеи о необходимости учета ускорения КВМ при рассмотрении СПС были высказаны в работах [33, 34]. Особняком стоит постепенное событие 7 марта 2011 г., в котором основной HXR всплеск был заведомо на постэруптивной фазе вспышки [21].

Рис. 3б акцентирует внимание на различиях времен первого прихода протонов и скорости ро-

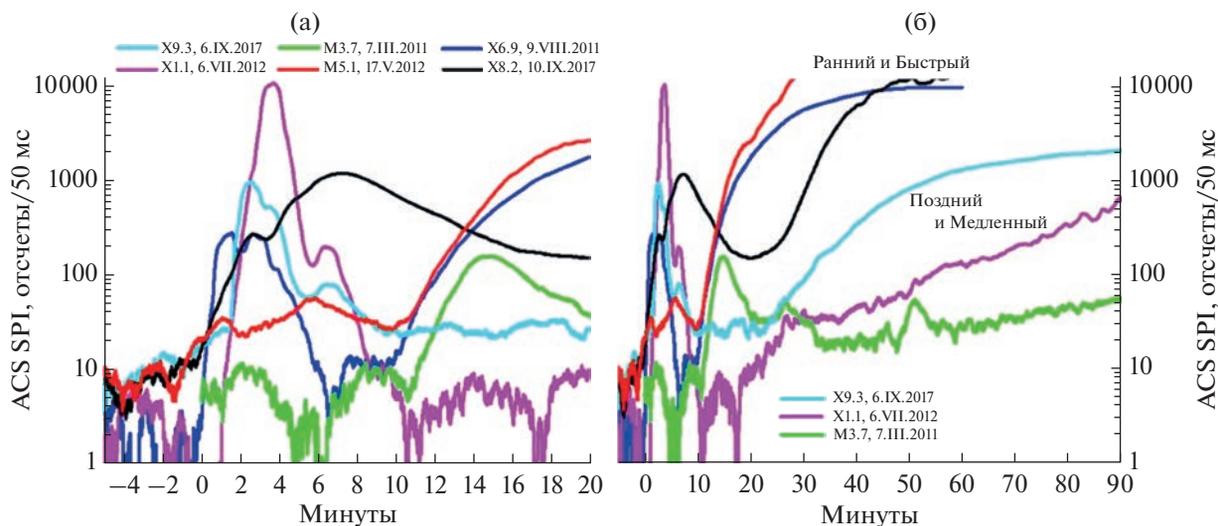


Рис. 3. Временные профили темпа счета ACS SPI за 50 мс (сглаженные средние за 1 мин, фон вычтен) в событиях 5, 8, 14 с благоприятными РА и 2, 9, 13 с неблагоприятными РА (согласно табл. 1 и рис. 4). Панель (а) и (б) различаются горизонтальным масштабом.

ста их интенсивности (по данным ACS SPI) в рассматриваемых СПС. Характер роста интенсивности СП определяется функцией инжекции СП на благоприятную силовую линию. Кривые, показывающие ранний и быстрый рост, имеют благоприятный угол РА, а кривые с поздним и медленным ростом – неблагоприятный. Таким образом, мы выделили две группы событий, которые характеризуются: 1) ранним приходом протонов и быстрым ростом их интенсивности (благоприятный РА); 2) задержанным (поздним) приходом протонов и медленным ростом их интенсивности (неблагоприятный РА). Эти группы практически не отличаются друг от друга скоростями V_{cp} и V_{12} (см. табл. 1), но отличаются координатами вспышек и величиной РА. Отметим, что $V_{cp} > V_{12}$ (см. табл. 1) только в случае двух длинных постепенных вспышек 7 марта 2011 г. и 27 января 2012 г., когда ускорение КВМ [8] должно было быть заведомо до наблюдаемого HXR излучения, во время и после него.

Направления распространения КВМ (SOHO LASCO C2) представлены на рис. 4. Показаны вторые кадры распространения КВМ в шести событиях 24-го цикла из рис. 3. Три горизонтальных ряда отличаются свойствами родительских вспышек в мягком рентгеновском (SXR) излучении: (а, б) – ярко выраженная импульсная фаза, (в, г) – без импульсной фазы (постепенная вспышка), (д, е) – слабо выраженная импульсная и длительная постэруптивная фазы вспышки. Круги и проведенные радиусы на панелях рис. 4 показывают значение угла РА. Стрелки показывают, какие именно явления, отождествляются на кадрах с КВМ. Максимальные скорости КВМ в поле зре-

ния LASCO C2 достигались в случаях (д, е), но это не привело, как можно было бы ожидать, к более раннему приходу протонов с точки зрения авторов работы [35]. Наблюдаемый угол РА систематизирует времена первого прихода протонов и темп роста их интенсивности. В случаях раннего прихода протонов и быстрого роста их интенсивности КВМ преимущественно распространялся в плоскости эклиптики (РА ~ 270°), а в случаях задержанного (позднего) прихода и медленного роста – вне нее.

На рис. 5 показаны события 13 декабря 2006 г. (GLE 70, 23-й цикл [29, 30]) и 28 октября 2021 г. (GLE 73, 25-й цикл [31, 32, 42–44]). Протонное событие 13 декабря (GLE 70, см. табл. 1) разрушает предложенную интерпретацию наблюдений на базе шести событий на рис. 3, 4, не зря его называют Maverick – “Иноходец” [41]. Значение РА = 193° (неблагоприятный угол) соответствует задержанному приходу протонов, хотя время начала протонного возрастания на ACS SPI (учитывая рентгеновский фон) относительно раннее +16.5 мин [29]. Возможно, это связано со сложным характером эрупции [30] и отсутствием наблюдений LASCO в этом событии до +33 мин (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/). В случае же протонного события 28 октября (GLE 73, см. табл. 1) положение активной области на солнечном диске (S26W02) не позволяет однозначно отождествить поздний приход протонов и медленный рост их интенсивности со значением РА = 189°. В этих двух событиях значения РА близки, и можно спекулировать, приписывая наблюдаемое различие времен первого прихода распространению протонов по долготе.

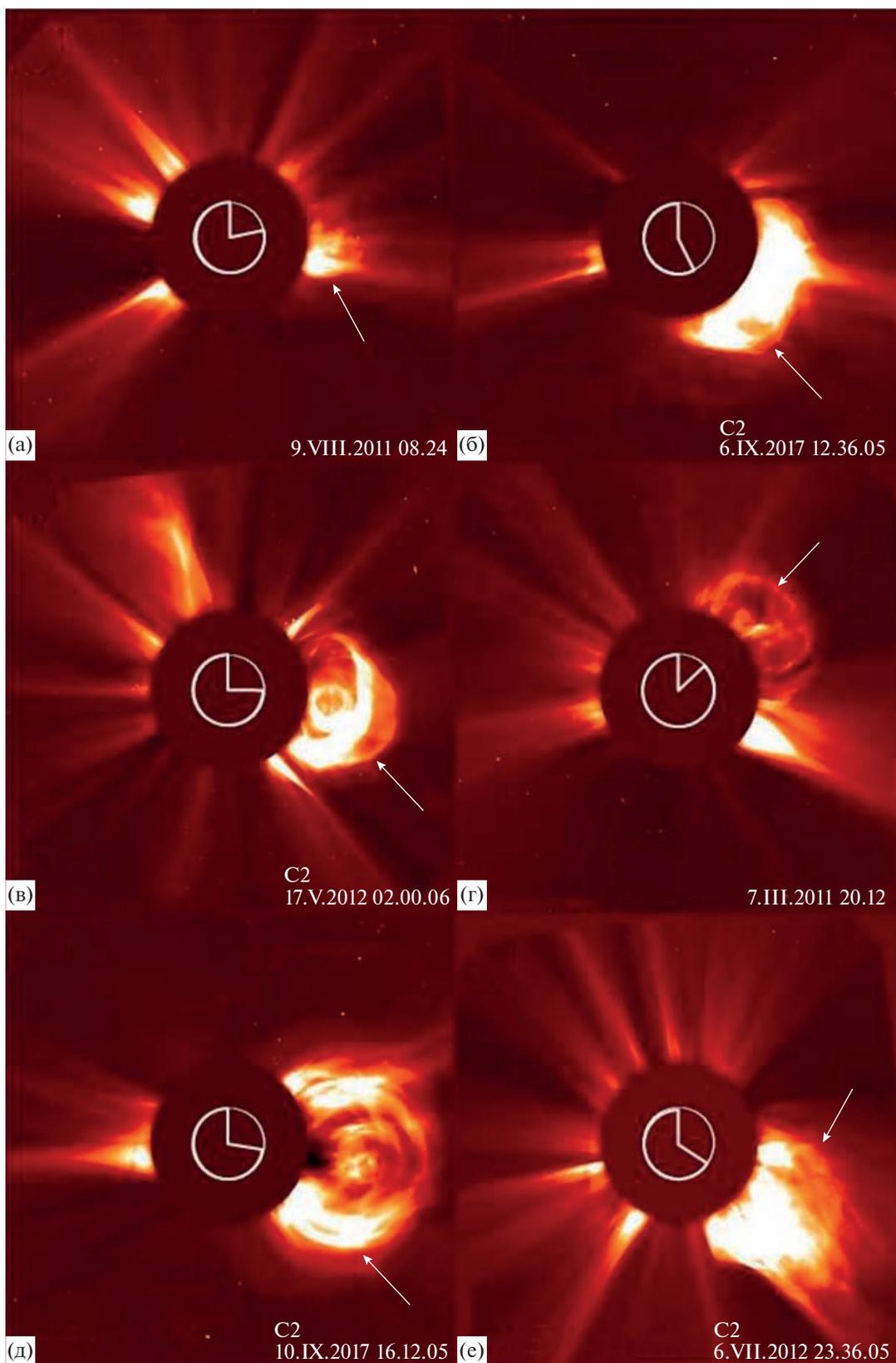


Рис. 4. Второй кадр наблюдения КВМ в поле зрения LASCO C2: левые панели (а, в, д) показывают благоприятное распространение КВМ; правые панели (б, г, е) – неблагоприятное (см. рис. 3 и табл. 1).

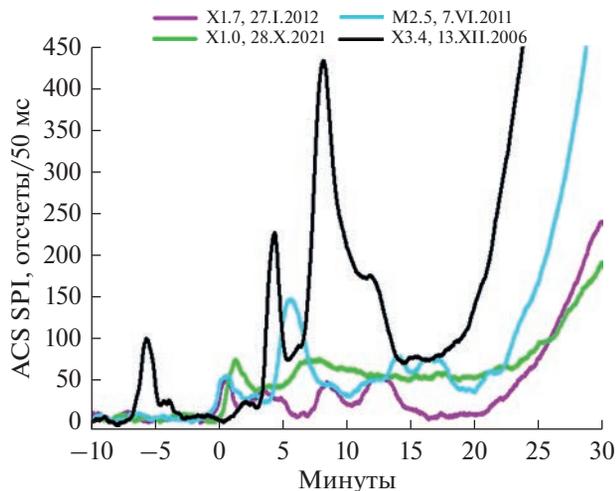


Рис. 5. Временные профили темпа счета ACS SPI за 50 мс (сглаженные средние за 1 мин, фон вычтен) в событиях 1, 3, 7, 15 (согласно табл. 1).

Два других события на рис. 5: 6 июня 2011 г. и 27 января 2012 г. – события без GLE, для которых первый приход протонов на +20 мин ожидаемый. Положение вспышек и направление распространения КВМ относительно эклиптики в них были симметричными (S21W54 (S21 < S32) и N27W71 (N27 ≈ N22), соответственно, см. табл. 1). Различие долгот вспышек укладывается в наши оценки размера источника СП. Самый медленный рост сигнала ACS SPI на рис. 5 у события 28 октября 2021 г. (S26 < S81, см. табл. 1).

На рис. 6 приведено сравнение всех GLE событий, рассмотренных в нашей работе, с событиями

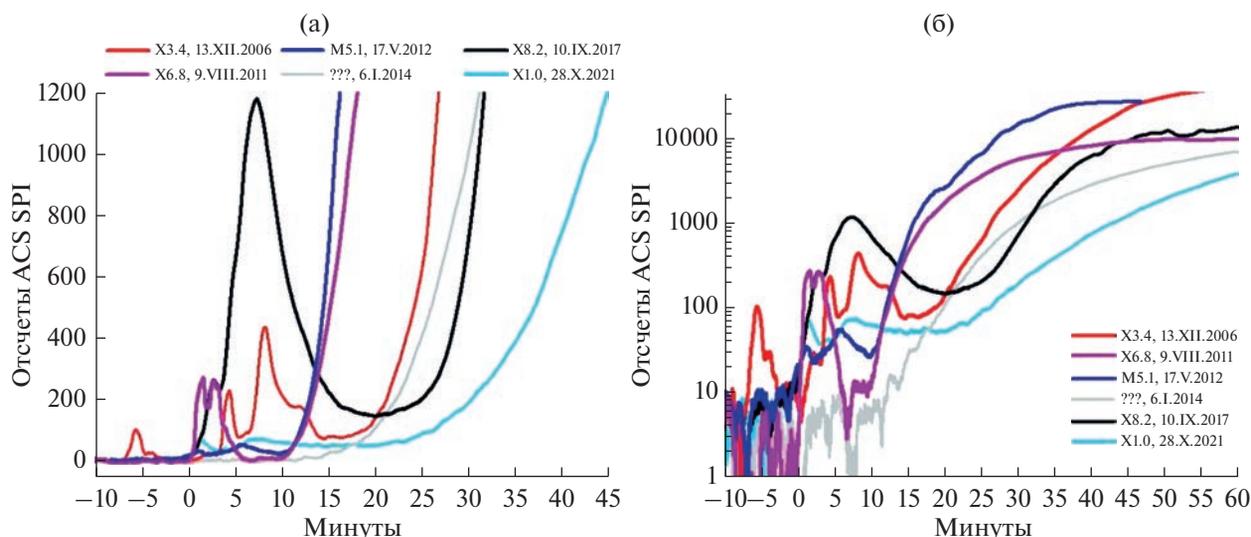


Рис. 6. Временные профили темпа счета ACS SPI за 50 мс (сглаженные средние за 1 мин, фон вычтен) в событиях GLE 70, 71, 72 и 73 (согласно табл. 1, строки 1, 8, 14, 15) и subGLE (согласно табл. 1, строка 10) и событиями без GLE (согласно табл. 1, строка 5).

ем без GLE 9 августа 2011 г. [18, 20] и событием subGLE 6 января 2014 г. [36, 37]. Это важно, так как 9 августа (без GLE) – пример самого быстрого развития протонного возрастания (приход протонов на +10 мин), а subGLE (от залимбового источника) – ожидаемо медленного (рис. 6а). Заметим, что самый быстрый приход протонов был в GLE 69 20 января 2005 г. [3, 45] на +8 мин, если выбрать 0 времени (06.40 UT) как в работе [29]. Мы не включили это событие в таблицу в виду плохих наблюдений КВМ на LASCO.

Пара 9 августа 2011 г. и 17 мая 2012 г. подробно рассмотрена в работе [20], где было показано, что 9 августа не хватило времени для ускорения протонов в нужном количестве до релятивистских энергий для создания GLE. Однако в этих событиях протоны с $E \sim 100\text{--}500$ МэВ вышли в МП раньше +10 мин, т.е. режим ускорения был самым “быстрым”.

Во всех рассмотренных четырех GLE и одном subGLE первый приход протонов наблюдался до +20 мин (в GLE 72 по данным НМ), что соответствует “быстрому” режиму ускорения. Однако темпы роста интенсивности протонов различались. Темп указывает на функцию инжекции, которая зависит от режима ускорения и процесса распространения в короне. На рис. 6б скорость роста вначале не определяет максимальные значения интенсивности протонов на орбите Земли, необходима длительная и постепенная инжекция на силовую линию в МП. Характеристики (амплитуды) возрастаний HXR излучения не связаны с характеристиками потоков протонов в геиосфере.

Взгляд на источники СП при ускорении на ударной волне КВМ описывается для GLE событий 23-го цикла в статье [46] и других значимых GLE событий в статье [47]. Работы с теми же идеями об ускорении СП по событиям 24-го цикла процитированы выше [16, 24, 33–35, 37, 38]. Основные выводы [46, 47]: ускорение частиц и выход в МП происходят на гелиоцентрических расстояниях $2-4R_s$ в широком телесном угле (до 100°) по долготе. При этом высота источника растет при увеличении телесного угла. В нашей качественной модели развития эруптивных вспышек ускорение частиц происходит на высотах до $\sim 1.25R_s$, а их основной выход на благоприятную силовую линию происходит при пересечении фронта ударной волны как в [46, 47]. Незначительные потоки протонов могут раньше достичь благоприятной силовой линии за счет поперечной диффузии.

ВЫВОДЫ

Введение условного нуля времени солнечных вспышек (начало радиоизлучения на частотах 8.8–15.4 ГГц) и предположение о необходимом времени ускорения электронов до энергии ~ 100 кэВ (десятки или сотни мс) позволили упорядочить и классифицировать протонные возмущения на ACS SPI:

- “Быстрое” ускорение электронов (десятки мс) соответствует “раннему” приходу протонов на орбиту Земли (< 20 мин) относительно выбранного нуля времени (события 1, 5, 8, 10, 14 в табл. 1). При длительности стохастического ускорения протонов > 10 мин возможно ускорение протонов до релятивистских энергий и, следовательно, реализация “раннего” (< 20 мин) GLE при достаточном количестве СП.

- “Медленное” ускорение электронов (сотни мс) соответствует “позднему” приходу протонов (> 20 мин) (события 3, 4, 6, 7, 9, 13, 15 в табл. 1). При длительности стохастического ускорения протонов > 20 мин возможно достижение ими релятивистских энергий и реализация “позднего” (> 20 мин) GLE при достаточном количестве СП.

- При любом режиме ускорения электронов в большом объеме, занятом эруптивной вспышкой, реализуется источник СП с большими угловыми размерами (т.е. корональное распространение).

- “Задержанный” приход протонов (> 30 мин, события 2, 11, 12 в табл. 1) является следствием ухудшения условий распространения (т.е. коронального удержания при неблагоприятном направлении распространения КВМ), при этом условия распространения в МП практически не меняются.

- Направление распространения КВМ характеризуется в поле зрения коронографа LASCO

позиционным углом (РА). Параметр РА необходимо учитывать при анализе протонных событий.

Работа подготовлена на основе трех докладов авторов на 37-й Всероссийской конференции по космическим лучам памяти М.И. Панасюка, 27 июня–2 июля 2022 г., в НИИЯФ МГУ. Авторы благодарны организаторам конференции за предоставленную возможность.

Работа была поддержана субсидиями по темам “Плазма” (АБС и АМС) в ИКИ РАН и “МАС” (ИЮГ) в ГАО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cliver E.W.* History of research on solar energetic particle (SEP) events: the evolving paradigm // *Universal Helio-physical Processes Proc. IAU Symposium No. 257 / eds N. Gopalswamy & D.F. Webb.* 2008. P. 401–412. <https://doi.org/10.1017/S1743921309029639>
2. *Мирошниченко Л.И.* Солнечные космические лучи: 75 лет исследований // *УФН.* 2018. Т. 188. № 4. С. 345–376. <https://doi.org/10.3367/UFNr1017.03.038091>
3. *Klein K.-L.* Radio Astronomical Tools for the Study of Solar Energetic Particles II. Time-Extended Acceleration at Subrelativistic and Relativistic Energies // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences.* 2021. V. 7. Art. 580445. <https://doi.org/10.3389/fspas.2020.580445>
4. *Kahler S.W., Hildner E., van Hollebeke V.A.I.* Prompt solar proton events and coronal mass ejections // *Sol. Phys.* 1978. V. 57. P. 429–443.
5. *Bazilevskaya G.A.* On the early phase of relativistic solar particle events: Are there signatures of acceleration mechanism? // *JASR.* 2009. V. 43. Iss. 4. P. 530–536. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.08.005>
6. *Kahler S.W., Sheeley N.R., Jr., Howard R.A. et al.* Associations between coronal mass ejections and solar energetic proton events // *J. Geophys. Res.* 1984. V. 89. № A11. P. 9683–9694. <https://doi.org/10.1029/JA089iA11p09683>
7. *Kahler S.W.* Injection profiles of solar energetic particles as functions of coronal mass ejection heights // *Astrophys. J.* 1994. V. 428. P. 837–842.
8. *Cliver E., Kahler S., Vestrand W.* On the origin of gamma-ray emission from the behind limb flare on 29 September 1989 // *23rd Int. Cosmic Ray Conf.* 1993. V. 3. P. 91–94.
9. *Базилевская Г.А.* Эффекты коронального распространения солнечных протонов с энергией больше 100 МэВ // *Изв. АН СССР. Сер. физ.* 1984. Т. 48. № 11. С. 2171–2173.
10. *Klein K.-L., Chupp E.L., Trotter G. et al.* Flare-associated energetic particles in the corona and at 1 AU // *Astron. Astrophys.* 1999. V. 348. P. 271–285.
11. *Ackermann M., Ajello M., Albert A. et al.* High-energy gamma-ray emission from solar flares: summary of *Fermi* large area telescope detections and analysis of two M-class flares // *Astrophys. J.* 2014. V. 787. Iss. 1. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/787/1/15>
12. *Ajello M., Albert A., Allafort A. et al.* Impulsive and long duration high-energy gamma-ray emission from the

- very bright 2012 March 7 solar flares // *Astrophys. J.* 2014. V. 789. Iss. 1. Art. 20.
<https://doi.org/10.1088/0004-637x/789/1/20>
13. *Ajello M., Baldini L., Bastieri R. et al.* First Fermi-LAT Solar Flare Catalog // *Astrophys. J. Suppl.* 2021. V. 252. Art. 13.
<https://doi.org/10.3847/1538-4365/abd32e>
 14. *Ackermann M., Allafort A., Baldini L. et al.* Fermi-LAT observations of high-energy behind-the-limb solar flares // *Astrophys. J.* 2017. V. 835 Art. 219.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/835/2/219>
 15. *Cliver E.W.* Flare versus shock acceleration of high-energy protons in solar energetic particle events // *Astrophys. J.* 2016. V. 832. Art. 128.
<https://doi.org/10.3847/0004-637X/832/2/128>
 16. *Gopalswamy N., Yashiro S., Mäkelä P. et al.* The common origin of high-energy protons in solar energetic particle events and sustained gamma-ray emission from the Sun // *Astrophys. J.* 2021. V. 915. Art. 82.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac004f>
 17. *Струминский А.Б., Григорьева И.Ю., Логачев Ю.И. и др.* Солнечные электроны и протоны в событиях 4–10 сентября 2017 г. и сопутствующие явления // *Физика Плазмы.* 2020. Т. 46. № 2. С. 139–153.
<https://doi.org/10.31857/S0367292120020134>
 18. *Струминский А.Б., Григорьева И.Ю., Логачев Ю.И. и др.* Две фазы солнечных вспышек и стохастический механизм ускорения электронов и протонов // *Астрофизика.* 2020. Т. 63. № 3. С. 437–449.
 19. *Miller J.A., Cargill P.J., Emslie A.G. et al.* Critical issues for understanding particle acceleration in impulsive solar flares // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. A7. P. 14631–14660.
<https://doi.org/10.1029/97JA00976>
 20. *Григорьева И.Ю., Струминский А.Б.* Формирование источника солнечных космических лучей в eruptивных вспышках X6.9 9 августа 2011 г. M5.1 и 17 мая 2012 г. // *Астрон. журн.* 2022. Т. 99. № 6. С. 486–495.
<https://doi.org/10.31857/S0004629922060044>
 21. *Струминский А.Б., Григорьева И.Ю., Логачев Ю.И., Садовский А.М.* Связь между длительностью и величиной ускорения корональных выбросов массы // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2021. Т. 61. № 6. С. 683–693.
<https://doi.org/10.31857/S001679402105014X>
 22. *Струминский А.Б., Григорьева И.Ю., Логачев Ю.И., Садовский А.М.* Солнечные электроны и протоны во вспышках с выраженной импульсной фазой // *Изв. РАН Сер. физ.* 2021. Т. 85. № 8. С. 1180–1184.
<https://doi.org/10.31857/S0367676521080305>
 23. *Лысенко А.Л., Фредерикс Д.Д., Флейшман Г.Д. и др.* Рентгеновское и гамма-излучение солнечных вспышек // *УФН.* 2020. Т. 190. С. 878–894.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.06.038757>
 24. *Gopalswamy N., Makela P.* Latitudinal Connectivity of Ground Level Enhancement Events // *ASP Conference Series.* 2013.
 25. *Cliver E.W., Makhaldi F., Muscheler R.* Solar longitude distribution of high-energy proton flares: fluences and spectra // *Astrophys. J. Lett.* 2020. V. 900. Art. L11.
<https://doi.org/10.3847/2041-8213/abad44>
 26. *Winter L.M., Bernstein V., Omodei N. et al.* A Statistical Study to Determine the Origin of Long-duration Gamma-Ray Flares // *Astrophys. J.* 2018. V. 864. Art. 39.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aad3c0>
 27. *Share G.H., Murphy R.J., White S.M. et al.* Characteristics of Late-phase >100MeV Gamma-Ray Emission in Solar Eruptive Events // *Astrophys. J.* 2018. V. 869. Art. 182.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaebf7>
 28. *de Nolfo G.A., Bruno A., Ryan J.M. et al.* Comparing long-duration gamma-ray flares and high-energy solar energetic particles // *Astrophys. J.* 2019. V. 879. Art. 90.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab258f>
 29. *Струминский А.Б., Зимовец И.В.* К оценке времени прихода первых релятивистских солнечных протонов на Землю // *Изв. РАН Сер. физ.* 2009. Т. 73. № 3. С. 332–335.
 30. *Grechnev V.V., Kiselev V.I., Uralov A.M. et al.* An Updated View of Solar Eruptive Flares and the Development of Shocks and CMEs: History of the 2006 December 13 GLE-Productive Extreme Event // *Publ. Astron. Soc. Japan.* 2013. V. 65. Art. S9.
<https://doi.org/10.1099/pasj/65.sp1.S9>
 31. *Papaioannou A., Kouloumvakos A., Mishev A. et al.* The first ground-level enhancement of solar cycle 25 on 28 October 2021 // *Astron. Astrophys.* 2022. V. 660. Art. L5.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142855>
 32. *Mishev A.L., Kocharov L.G., Koldobskiy S.A. et al.* High resolution spectral and anisotropy characteristics of solar protons during the GLE № 73 on 28 October 2021 derived with neutron monitor analyses // *Sol. Phys.* 2022. V. 298. Iss. 7. Art. 88.
<https://doi.org/10.1007/s11207-022-02026-0>
 33. *Gopalswamy N., Xie H., Akiyama S. et al.* The first ground level enhancement event of solar cycle 24: direct observation of shock formation and particle release heights // *Astrophys. J.* 2013. V. 765. Art. L30
<https://doi.org/10.1088/2041-8205/765/2/L30>
 34. *Gopalswamy N., Yashiro S., Thakur N. et al.* The 2012 July 23 backside eruption: an extreme energetic particle event? // *Astrophys. J.* 2016. V. 833. Iss. 2. Art. 216.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/833/2/216>
 35. *Gopalswamy N., Yashiro S., Mäkelä P. et al.* Extreme kinematics of the 2017 September 10 solar eruption and the spectral characteristics of the associated energetic particles // *Astrophys. J.* 2018. V. 863. Iss. 2. Art. L39.
<https://doi.org/10.3847/2041-8213/aad86c>
 36. *Omodei N., Pesce-Rollins M., Longo F. et al.* Fermi-LAT Observations of the 2017 September 10 Solar Flare // *Astrophys. J.* 2018. V. 865. Art. L7.
<https://doi.org/10.3847/2041-8213/aae077>
 37. *Thakur N., Gopalswamy N., Xie H. et al.* Ground level enhancement in the 2014 January 6 solar energetic particle event // *Astrophys. J.* 2014. V. 790. Art. L13.
<https://doi.org/10.1088/2041-8205/790/1/L13>
 38. *Gopalswamy N., Mäkelä P. and Yashiro S.* Particle acceleration and transport at the Sun inferred from Fermi/LAT observations of >100 MeV gamma-rays // *Proc./ AOGS 2021 (18th Annual Meeting of the Asia Oceania Geosciences Society).* 2021. ArXiv:2108.11286.
 39. *Kocharov L., Omodei N., Mishev A. et al.* Multiple sources of solar high-energy protons // *Astrophys. J.*

2021. V. 915. Iss. 1. Art. 12.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/abff57>
40. *Pesce-Rollins M., Omodei N., Krucker S. et al.* The coupling of an EUV coronal wave and ion acceleration in a Fermi-LAT behind-the-limb solar flare // *Astrophys. J.* 2022. V. 929. Art. 172.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac5f0c>
41. *Bieber J.W., Clem J., Evenson P. et al.* A maverick GLE: the relativistic solar particle event of December 13, 2006 // *Proc. 30th ICRC.* 2008. V. 1. P. 229–232.
42. *Klein K.-L., Musset S., Vilmer N. et al.* The relativistic solar particle event on 28 October 2021: Evidence of particle acceleration within and escape from the solar corona // *A&A.* 2022. V. 663. Art. A173.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243903>
43. *Chertok I.M.* On some features of the solar proton event on 2021 October 28 – GLE73 // *MNRAS.* 2022. V. 517. Iss. 2. P. 2709–2713.
<https://doi.org/10.1093/mnras/stac2843>
44. *Li X., Wang Y., Guo J. et al.* Solar energetic particles produced during two fast coronal mass ejections // *Astrophys. J. Lett.* 2022. V. 928. Art. L6.
<https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac5b72>
45. *Струминский А.Б.* Многократное ускорение протонов на Солнце и их свободное распространение до Земли 20 января 2005 г. // *ПАЖ.* 2006. Т. 32. № 10. С. 767–776.
46. *Reames D.V.* Solar release times of energetic particles in ground-level events // *Astrophys. J.* 2009. V. 693. P. 812–821.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/693/1/812>
47. *Reames D.V.* Solar energetic-particle release times in historic ground-level events // *Astrophys. J.* 2009. V. 706. P. 844–850.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/706/1/844>