

УДК 523.985+524.1-52:523.9

ИСТОЧНИКИ ЭФФЕКТИВНОГО УСКОРЕНИЯ ЧАСТИЦ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ: НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ АСПЕКТ

© 2007 г. А. Р. Осокин, М. А. Лившиц, А. В. Белов

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова, г. Троицк, Россия*

Поступила в редакцию 15.12.2006 г.; после доработки 27.12.2006 г.

Продолжен статистический анализ каталога протонных событий для солнечных космических лучей. Изучены спектры протонных возрастных, отождествляемые с логарифмом отношения потоков частиц в диапазонах более 100 и 10 МэВ — величиной $\delta = \lg(F_{100}/F_{10})$ — для 172 мощных событий с благоприятными условиями выхода из короны и распространения частиц в межпланетном пространстве. Распределение числа вспышек по величине δ является гауссовским со сравнительно небольшим разбросом по δ . Его максимум соответствует превышению максимального потока на 10 МэВ над потоком на 100 МэВ в 30 раз. Существование выделенного спектра свидетельствует о том, что как мягкие, так и более жесткие протоны эффективно ускоряются во взрывной фазе вспышки, скорее всего, единым механизмом. Небольшая высота области основного ускорения следует из проведенного изучения размера петель вспышек балла M2-X4, зарегистрированных прибором НХТ Yohkoh в диапазоне более 50 кэВ. Существует некоторый избыток более “мягких” событий, выходящих за рамки распределения Гаусса. В этих событиях хорошо выражены постэруптивные явления. Для них величина δ коррелирует с введенной авторами полной длительностью вспышки. Таким образом, в солнечных вспышках существуют два источника ускорения частиц, действующие во взрывной и постэруптивной фазах на малых и больших высотах, соответственно. Во втором из них, непосредственно проявляющемся в некоторых длительных вспышках и явлениях типа выброса волокон, протоны ускоряются только до энергий 10–30 МэВ.

PACS: 97.60.Gb, 97.10.Kc, 97.10.Cv

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема ускорения частиц на Солнце является одной из наиболее важных, но до конца не решенных в настоящее время. Кроме возрастных космических лучей, регистрируемых наземными нейтронными мониторами, большие потоки ускоренных протонов детектируются космическими аппаратами. К настоящему времени выделено более тысячи таких событий в диапазоне энергии от нескольких до сотен МэВ. Каталог этих протонных событий за период от 1975 г. до настоящего времени в основном по данным спутников IMP-8 и GOES является частью базы данных по вспышкам и протонным событиям. Результаты статистического изучения каталога протонных событий представлены в статьях [1, 2]. В этих работах потоки протонов на уровне орбиты Земли сопоставлены с потоками мягкого рентгеновского излучения и характеристиками источника этого излучения, а также с положением вспышек на диске. Последнее сделано для тех 2/3 событий из общего их числа, превышающего 1000, регистрация ускоренных ча-

стиц от которых была уверенно отождествлена с конкретной солнечной вспышкой.

Проведенное статистическое изучение показало, что ускорение тяжелых частиц (далее речь будет идти о протонных возрастных (ПВ), связанных со вспышками) до энергии 10 МэВ начинает появляться уже во вспышках, рентгеновский балл которых близок к M1. Вероятность наблюдения солнечных протонов у Земли и величина их максимального потока в области энергий более 10 МэВ и более 100 МэВ сильно зависят от мощности вспышки и ее гелиодолготы. Эта вероятность существенно возрастает с мощностью событий, и каждая из 3 вспышек балла M3 и более, развивающаяся в благоприятной области гелиодолгот, является протонной. После всех удобно расположенных (западных) вспышек с рентгеновским баллом $\geq X5$ регистрируются ПВ. Гелиодолгота вспышки предопределяет и характер временного профиля протонных событий. В какой-то степени некоторые из этих выводов могли быть получены из существовавших ранее каталогов протонных событий (см., например, [3]), однако в [1, 2] они получены

наиболее надежно. Независимо проведенный нами новый анализ дополненной и скорректированной базы данных полностью подтверждает эти основные результаты [1, 2].

В [1, 2] были выявлены также несколько статистических связей между свойствами ПВ и характеристиками собственно солнечных вспышек. Этими характеристиками являлись: длительность мягкой рентгеновской вспышки (в шкале спутников GOES), время роста потока, температура и длина петли источника мягкого рентгеновского излучения и ее “импульсивность”. Последняя характеристика была введена в [4], смысл которой близок к скорости возрастания логарифма потока. Иначе говоря, в [1, 2] было показано, что вспышки, связанные с ПВ, отличается большая продолжительность, более медленное достижение рентгеновского максимума (меньшая импульсивность), более низкая температура и большая длина рентгеновских петель.

Чисто формально эти результаты не вызывают сомнений. Однако их физическая интерпретация, учитывающая современные представления о солнечных вспышках, встретилась с большими трудностями. Основное противоречие заключается в утверждении, что медленные вспышки характеризуются более эффективным ускорением частиц.

Формальный статистический анализ рассматривает каждую вспышку как один общий процесс. В действительности мощные солнечные вспышки характеризуются сложной пространственно-временной структурой. Каждая из них представляет собой последовательность отдельных вспышечных эпизодов, в той или иной степени связанных между собой. Фаза ускорения частиц, особенно с релятивистскими энергиями, соответствует времени самого жесткого рентгеновского всплеска и в больших вспышках чаще всего не является первым из тех событий, которые входят в общий процесс. Поэтому актуальным явился анализ некоторого количества конкретных ПВ с учетом пространственно-временной структуры тех больших солнечных вспышек, которые их вызывают.

Вспышка, или отдельное составляющее ее событие, включает в себя выброс (эрупцию), сопровождающую внезапное энерговыделение, и развивающуюся затем постэруптивную систему петель. Будем называть время, в течение которого происходят несколько последовательных всплесков жесткого ($h\nu > 15$ кэВ в событиях средней мощности и $h\nu > 50$ кэВ в мощных вспышках) рентгеновского излучения, взрывной (flash) фазой вспышки. Как правило, основные высокоэнергичные процессы происходят в месте первичного энерговыделения и той петле магнитных силовых линий, которая связывает эту точку с областью противоположной магнитной полярности. Будем, как это введено в

работе [5], область первичного энерговыделения и соответствующую петлю называть энергетическим ядром вспышки. Последующее общее развитие вспышки, кроме ее энергетики, тесно связано как с локализацией места основного энерговыделения в магнитном поле комплекса активности, так и со свойствами выброса [6].

Ускорение частиц может быть связано как с процессами в ядре вспышки, так и с последующими явлениями в ходе постэруптивной фазы — ускорением в вертикальном токовом слое или на ударной волне. Энерговыделение и ускорение частиц возникают на заключительной стадии события таким образом, как это предполагалось ранее в модели Коппа и Пноймана, а именно, когда часть магнитных силовых линий над активной областью раскрывается после коронального выброса массы и (или) возможного выброса волокна и в дальнейшем магнитное поле релаксирует к новой квазиравновесной конфигурации посредством магнитного пересоединения в протяженных вертикальных токовых слоях. Еще одним источником ускорения является ударная волна, формирующаяся в короне перед достаточно быстро распространяющимся корональным выбросом массы.

Во многих работах ранее ускорение протонов до энергий около 10 МэВ не без оснований связывалось с ударной волной перед быстро распространяющимся СМЕ [7, 8], и этот вывод переносился на область релятивистских энергий. В последующие десятилетия развернулась дискуссия между сторонниками ускорения тяжелых частиц на ударной волне и в небольшом низко расположенном вспышечном источнике близ пятна. При этом как одна, так и другая точка зрения поддерживалась рядом экспериментальных и теоретических аргументов.

Только с появлением новых наблюдательных данных начали появляться аргументы, позволяющие надеяться на разрешение этого конфликта. Первый пласт этих наблюдений связан с детальным изучением ряда мощных событий, таких как вспышка в день Бастилии [9] или событие 20 января 2005 г. [10]. В этих работах приводится ряд аргументов в пользу эффективного ускорения тяжелых частиц во взрывной фазе вспышки, в источнике, располагающемся на небольшой высоте вблизи пятна.

Вторая группа работ связана с появлением статистически значимого объема данных о ПВ. Как мы уже говорили, исследование было уже проведено в [1, 2], и оно оперировало в основном с потоками ускоренных протонов. Чтобы как-то ослабить влияние общей энергетики конкретной вспышки на выявление общих характеристик источника ПВ, мы в этой работе, в отличие от [1, 2], обратились к анализу спектров частиц, регистрируемых на околоземных орбитах.

Что можно сказать об изменениях спектра, используя появившиеся данные о сотнях ПВ? Этот вопрос анализируется в разделе 2. При этом потребовалось вернуться к затронутым в [1, 2] вопросам о связи характеристик ускоренных частиц с длительностью вспышек и их “импульсивностью”. По радиоданным и собственно по анализу ПВ обнаружилась тенденция к постоянству спектра в явлениях с эффективным ускорением частиц. Серьезное смягчение спектра происходит в событиях с ослабленной взрывной фазой и с хорошо развитыми постэруптивными явлениями. Анализ этой проблемы сильно затруднен в связи с необходимостью учета влияния условий выхода частиц из короны и их распространения в межпланетном пространстве. Чтобы как-то дистанцироваться от них, мы в разделе 3 обратились к данным о жестком электромагнитном излучении мощных вспышек. На этом пути удастся получить оценку размера петли, в которой развиваются высокоэнергичные явления. В заключении кратко суммируются полученные результаты и обсуждается роль факторов, способствующих ускорению частиц до высоких энергий.

2. СПЕКТР ПРОТОННЫХ ВОЗРАСТАНИЙ

2.1. Существование наиболее часто встречающегося спектра

Ниже используются данные о ПВ, достаточно надежно отождествленных со вспышками. Статистическое изучение амплитуды этих событий уже проведено в работах [1, 2] для диапазонов энергий более 10 МэВ и более 100 МэВ. Для ПВ средние значения числа частиц около Земли коррелируют с мощностями вспышки. На соответствующем рис. 10 в статье [1] для ассоциированных вспышек в интервале долгот 15W–75W потоки протонов F при энергиях более 10 МэВ примерно в 30 раз превышают потоки при энергиях более 100 МэВ.

В этой статье мы вернулись к анализу данных о ПВ, используя только ПВ, надежно отождествленные с солнечными вспышками и с измеримым потоком протонов в области более 100 МэВ. Принималось, что поток был не менее 0.07 rfu (rfu = = прот./см²·с·ср) при $E \geq 100$ МэВ для ассоциированных вспышек в долготном интервале от 20E до западного лимба. В действительности большинство рассматриваемых вспышек были достаточно мощными и имели потоки в этом жестком интервале от 0.2 до 20 rfu и в мягком диапазоне ($E \geq 10$ МэВ) от нескольких десятков до десятков тысяч rfu. Разумеется, при этом большинство рассматриваемых здесь вспышек происходили в западной части диска. Всего в первых двух разделах статьи будут использоваться данные о 172 ПВ, из которых только одна вспышка класса C9 и

несколько вспышек слабее M3, а большинство событий представляют собой X-вспышки.

Сами потоки протонов в диапазонах более 10 МэВ (и в более жестком диапазоне $E \geq 100$ МэВ) различаются на 3–4 порядка. В работах [1, 2] проявляется то, что более длительные солнечные вспышки чаще сопровождаются ПВ. Однако зависимость вероятности возникновения ПВ от длительности вспышки проявляется слабо, и, главным образом, она связана с основным из выявленных свойств — зависимостью между эффективностью ускорения частиц и общей энергетикой конкретного явления. Хотя бы частично этот последний фактор можно исключить, рассматривая относительное распределение частиц по энергиям, т.е. спектр.

Итак, потоки частиц в обоих диапазонах фактически не зависят от длительности вспышек t_{GOES} , которые определяются стандартным образом по минутным данным мягкого канала спутника GOES. Величина t_{GOES} определяется как интервал времени между началом вспышки (первой из тех 4 мин, в течении которых поток мягкого рентгена непрерывно возрастает) и ее условным концом. Последним считается момент, когда поток, после прохождения максимального значения, падает до 1/4 его величины. Такое определение характеризует длительность существования только мощного потока мягкого рентгеновского излучения и не учитывает того, развиваются постэруптивные явления или нет. Для рассматриваемых здесь мощных вспышек величины t_{GOES} характеризуют чаще всего так называемую взрывную (flash) фазу, во время которой происходит основное выделение энергии. Среднее по 172 вспышкам значение потока в диапазоне свыше 100 МэВ составляет 31.07 ± 7.83 rfu, а в диапазоне свыше 10 МэВ — 772.8 ± 217.8 rfu. Отношение этих средних величин равно $F_{100}/F_{10} = 0.40 \pm 0.02$, что соответствует величинам $\lg(F_{100}/F_{10}) = -1.40$ (в пределах от -1.22 до -1.72).

Величина $\delta = \lg(F_{100}/F_{10})$ может рассматриваться как аналог показателя интегрального степенного спектра протонов, определенный по двум энергетическим каналам. Величины F_{100}/F_{10} различаются для рассматриваемых событий на 3–4 порядка, как и сами потоки частиц, и не демонстрируют никакой зависимости от длительности явлений. Это иллюстрируется на рис. 1, где рассматриваемое отношение потоков приводится в зависимости от длительности t_{GOES} . На рисунке мы ограничились величиной $t_{GOES} = 330$ мин, исключив 3 мощные вспышки 22 июля 1978 г., 19 и 24 октября 1989 г. с длительностью $t_{GOES} = = 427, 464$ и 528 мин, соответственно. Показанная

на рисунке линейная аппроксимация всех этих данных демонстрирует отсутствие какой-либо заметной зависимости от длительности.

Приведенное выше среднее значение величины F_{100}/F_{10} близко к тому, которое находится по линейной аппроксимации и составляет 0.053 ± 0.006 (логарифм самой величины $\delta = \lg(F_{100}/F_{10}) = -1.73$). Уже это различие между приведенными выше величинами -1.40 и -1.73 говорит о том, что распределение числа событий с различными показателями спектра не является полностью случайным.

Само это распределение дано на рис. 2 в виде гистограммы (число событий с данным δ). Определенно видно, что это распределение достаточно близко к гауссовскому. Мы его аппроксимировали гауссианой. Подавляющее число событий удовлетворяет этой аппроксимации, что свидетельствует о существовании определенной формы спектра ПВ, к которой тяготеют большинство из рассматриваемых мощных явлений. Центр распределения соответствует $\delta = -1.51$, а полуширина распределения $\sigma = 0.49$. Укажем, что здесь также статистически подтверждается различие потоков в 30 раз в рассматриваемых диапазонах.

Некоторая асимметрия гистограммы свидетельствует об определенном избытке числа явлений в левой части гистограммы. Избыток событий с мягким спектром ($\delta < -2.5$) составляет $\approx 13\%$ от полного числа явлений (23 из 172 вспышек).

Итак, анализ описываемых таким образом спектров ПВ свидетельствует, вероятно, о том, что существует выделенный, наиболее часто встречающийся спектр. Для этих событий величина $\delta \approx -1.5$, и гауссовское распределение достаточно узко. Этот результат априори не ожидался, так как предполагалось, что множество возможных механизмов ускорения и разнообразие условий выхода из солнечной короны и распространения частиц от Солнца до Земли должно полностью сглаживать различие этого отношения для конкретных событий. Дополнительные интересные выводы получаются из более детального рассмотрения особенностей событий с мягким спектром.

2.2. Анализ протонных возрастных с заметным количеством релятивистских частиц, но с мягким спектром

Мы рассмотрели характеристики 23 явлений в мягком хвосте за пределами гауссовского распределения с $\delta < -2.5$. Для специалистов по физике Солнца один список этих явлений уже дает указания на то, что большинство данных событий характеризуется развитой постэруптивной фазой.

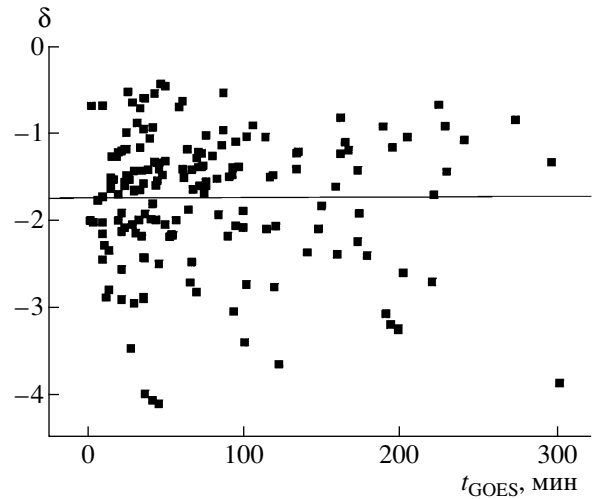


Рис. 1. Зависимость отношения потоков F_{100}/F_{10} от длительности вспышек в шкале спутников GOES.

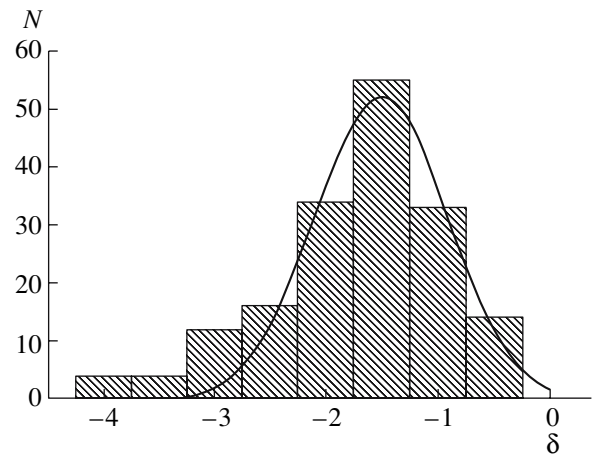


Рис. 2. Распределение числа N протонных возрастных по величинам $\lg(F_{100}/F_{10})$.

Иначе говоря, в этих событиях температура в источнике мягкого рентгеновского излучения экспоненциально уменьшается с характерным временем от одного до десятков часов (интервал времени существования постэруптивных петель t_3 , введенный ранее в работе [11]). Здесь мы не определяли собственно температуру, а ввели новую характеристику полной длительности вспышек $-t_{wh}$. Эта величина отсчитывается от начала вспышки в мягком рентгеновском диапазоне спутника GOES до того момента, когда поток уменьшается до уровня, в 3 раза превышающего фоновые значения.

В нескольких событиях рентгеновские наблюдения не позволили определить t_{wh} , в основном, из-за наложения последующих вспышек на фазе спада кривой блеска. Данные, относящиеся к оставшимся 15 событиям с $\delta < -2.5$, представлены

Мощные протонные возрастания с мягким спектром

Дата	Начало (UT)	t_{GOES} , мин	t_{GOES}^{rise} , мин	t_{wh} , мин	Рентгеновский/оптический балл	Широта/долгота, град.	Поток протонов, pfu		δ
							>10 МэВ	>100 МэВ	
15.08.1989	1:59	194	55	228	X1.0/SF	-18/73	316	0.2	-3.20
30.11.1989	11:45	199	40	197	X2.6/3B	24/52	1910	1.09	-3.24
19.03.1990	4:39	101	29	252	X1.5/2B	31/43	636	0.25	-3.41
07.07.1991	1:20	46	11	490	X1.9/2B	26/-3	1300	0.1	-4.11
08.05.1992	15:37	199	3	401	M7.4/4B	-26/-8	2000	1.09	-3.26
30.10.1992	17:02	301	28	554	X1.7/2B	-22/61	1500	0.2	-3.88
04.06.1999	6:52	19	11	79	M3.9/2B	17/69	64	0.2	-2.51
12.09.2000	11:31	102	42	320	M1.0/2N	-17/9	300	0.55	-2.74
26.11.2000	16:34	22	14	132	X4.0/2B	18/38	400	1.1	-2.56
22.11.2001	22:32	58	58	270	M9.9/-	15/34	4500	4	-3.05
28.05.2003	0:17	22	10	368	X3.6/2B	-7/17	121	0.15	-2.91
26.10.2003	17:21	120	58	282	X1.2/1N	2/38	466	0.8	-2.77
03.11.2003	1:09	36	21	110	X2.7/2B	10/83	400	1.5	-2.43
03.11.2003	9:43	36	12	129	X3.9/2F	8/77	400	0.5	-2.90
19.09.2004	16:46	53	26	213	M1.9/2B	3/58	46	0.3	-2.18

в таблице и на рис. 3. Здесь видно, что отношение F_{100}/F_{10} уменьшается примерно на порядок величины при переходе от обычных двухленточных вспышек (с $t_{GOES} \leq 1$ ч) к явлениям с длительным существованием постэруптивных петель. Априори ожидалось, что более неблагоприятные условия распространения частиц будут делать потоки более “мягкими”. Здесь этот эффект, возможно,

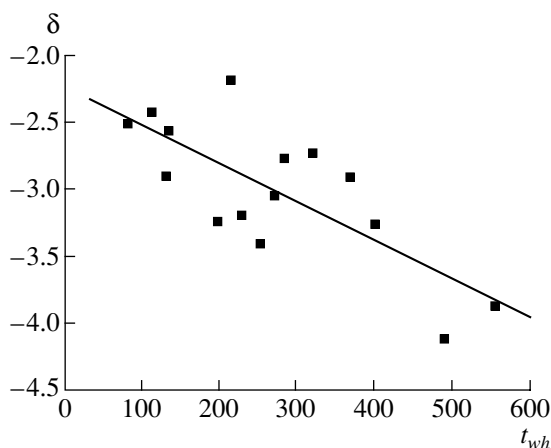


Рис. 3. Зависимость отношения $\lg(F_{100}/F_{10})$ от полной длительности вспышек t_{wh} для протонных возрастаний с мягким спектром ускоренных протонов.

проявился, но зависимость от свойств собственно солнечных вспышек, в частности, от t_{wh} , осталась.

Можно убедиться в том, что в подавляющем числе обсуждаемых 15 явлений ударная волна как около Солнца и соответственно радиовсплеск II типа, так и ударная волна в межпланетном пространстве были хорошо развитыми. Такое же утверждение справедливо и в отношении коронального выброса массы для тех лет, когда эти явления стали регистрироваться. Таким образом, рис. 3 можно рассматривать как указание на то, что в событиях, оказавшихся на рис. 2 в области δ мягче -2.5 вне гауссовской кривой, должен существовать второй, дополнительный источник ускорения протонов. Скорее всего, он развивается уже на постэруптивной стадии вспышки и приводит к ускорению протонов только до энергий 10 МэВ и лишь в некоторых случаях 30 МэВ.

2.3. Слабые протонные возрастания

Заметим, что в этой статье мы рассматривали 172 ПВ, которые являлись достаточно мощными. Соответственно, и те 15 длительных событий характеризуются весьма большими потоками частиц, в частности, в области энергий, превышающих 10 МэВ (таблица). Разумеется, можно было включить в рассмотрение еще более 200 слабых ПВ

и проверить этот серьезный вывод на большем статистическом материале. Однако по ряду причин это сделать не удастся, и нами предпринимаются попытки для обеспечения включения в это рассмотрение более слабых событий. До завершения этой работы можно, однако, обсудить известные факты и привести несколько примеров изучения более слабых ПВ.

Действительно, большое количество небольших ПВ связано со вспышками баллов от C1 до M5. Чаще всего те мощные западные вспышки, ПВ от которых очень слабое, характеризуются кривой блеска в мягком рентгеновском диапазоне с постепенным возрастанием и спадом потока. Форма этой кривой близка к многочисленным случаям регистрации в области 1–8 Å явлений исчезновения волокон. Еще начиная с данных спутника Yohkoh известно, что самые грандиозные из таких явлений, называемые глобальной перестройкой структуры короны, связаны с выбросом определенного сектора протуберанцев в венце, опоясывающем полюса Солнца. Примером может служить работа МакАлистера и др. [12] по известным явлениям в апреле 1994 г. Этот и несколько других подобных случаев характеризуются сильными геомагнитными возмущениями (в апреле 1994 г. с индексом Dst около 200 нТ) и ускорением протонов до энергий около 10 МэВ.

Приведем несколько примеров явлений меньшего масштаба. Один из промежуточных случаев между большими ПВ и эффектами, связанными только с исчезновением волокон, показан на рис. 4. Этот случай рассматривался и в предыдущем разделе (таблица), он относится к выбросу волокна 12 сентября 2000 г. и связанной с ним вспышкой балла M1.0/2N с координатами 17S, 9W. Это событие отличается от других явлений глобальной перестройки структуры короны тем, что последние происходят заметно ближе к полюсам. Частицы от нестационарного процесса 12 сентября 2000 г. достигли магнитосферы Земли, но потоки оказались на 1–2 порядка меньше тех, которые характерны для больших ПВ. На рис. 4 (внизу справа) потоки протонов приведены по регистрациям на спутнике IMP. Поток для этого события составляет 300 и 0.55 rfu для используемых здесь энергетических диапазонов, и соответственно отношение $\delta = \lg F_{100}/F_{10} = -2.73$ для этого события уже выходит за рамки гауссовской аппроксимации данных на рис. 2. Полная длительность t_{wh} была близка к 6 ч, но форма рентгеновской кривой блеска была типично вспышечной (рис. 4, внизу слева).

Один из многочисленных примеров исчезновения волокон демонстрируется на рис. 5. Рентгеновское возрастание потока идентифицировалось как вспышка балла C4.1 (1F, 29N, 13W), начавшаяся

24 июня 1999 г. в 12 : 04 UT. На рис. 5 внизу видна “бухта” с постепенным подъемом и спадом потока в течение времени с 12 ч примерно до 17 ч. Потоки протонов достигали 1.1, 0.38 rfu для диапазонов свыше 10 и 60 МэВ, а в диапазоне свыше 100 МэВ поток был ниже предела регистрации 0.005. Активизация и выброс волокна сопровождалась затем появлением в хромосфере двух слабых, но очень длинных лент (рис. 5, вверху). Отличие от события 12 сентября 2000 г. состояло в меньшей “импульсивности” явления 24 июня 1999 г., что приближает его к многочисленным типичным регистрациям выбросов волокон.

Суммируя все изложенное в разделе 2, укажем, что изучение спектров мощных ПВ выявляет существование типичного спектра частиц. Это свидетельствует о некоторой универсальности механизма ускорения протонов и (или) физических условий в источнике. Разумеется, жесткость спектра ускоренных частиц не является строго постоянной, и частично наблюдаемый разброс величин δ связан с особенностями протекания конкретного процесса и физическими условиями в источнике. Этот разброс — значение σ — определяется как реальным отличием механизма ускорения и условий в нем, так и расширением гауссовской кривой, связанным с выходом частиц из короны и их дальнейшим распространением в межпланетном пространстве. Значительное же смягчение спектра в ряде случаев связано с развитием дополнительного источника ускорения частиц на постэруптивной фазе вспышек.

3. О РАЗМЕРЕ ПЕТЛИ, В КОТОРОЙ РАЗВИВАЮТСЯ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ВО ВСПЫШКАХ

Вернемся снова к явлениям с эффективным ускорением частиц, спектр которых на рис. 2 описывается распределением Гаусса. Одним из основных источников уширения этого распределения является различие условий выхода из короны и распространения протонов на пути от Солнца к месту их регистрации, в данном случае, околоземной орбите. Вспышки, происходящие в восточной части диска, фактически исключаются из рассмотрения; сильные искажения потоков и спектров солнечных космических лучей возникают при прохождении потоков через фронты ударных волн от предшествующих нестационарных процессов.

Эти эффекты распространения частиц не существенны для гамма-излучения солнечных вспышек. Поскольку имеются основания полагать, что тяжелые частицы и электроны ускоряются во вспышках в рамках единого процесса, информация о жестком

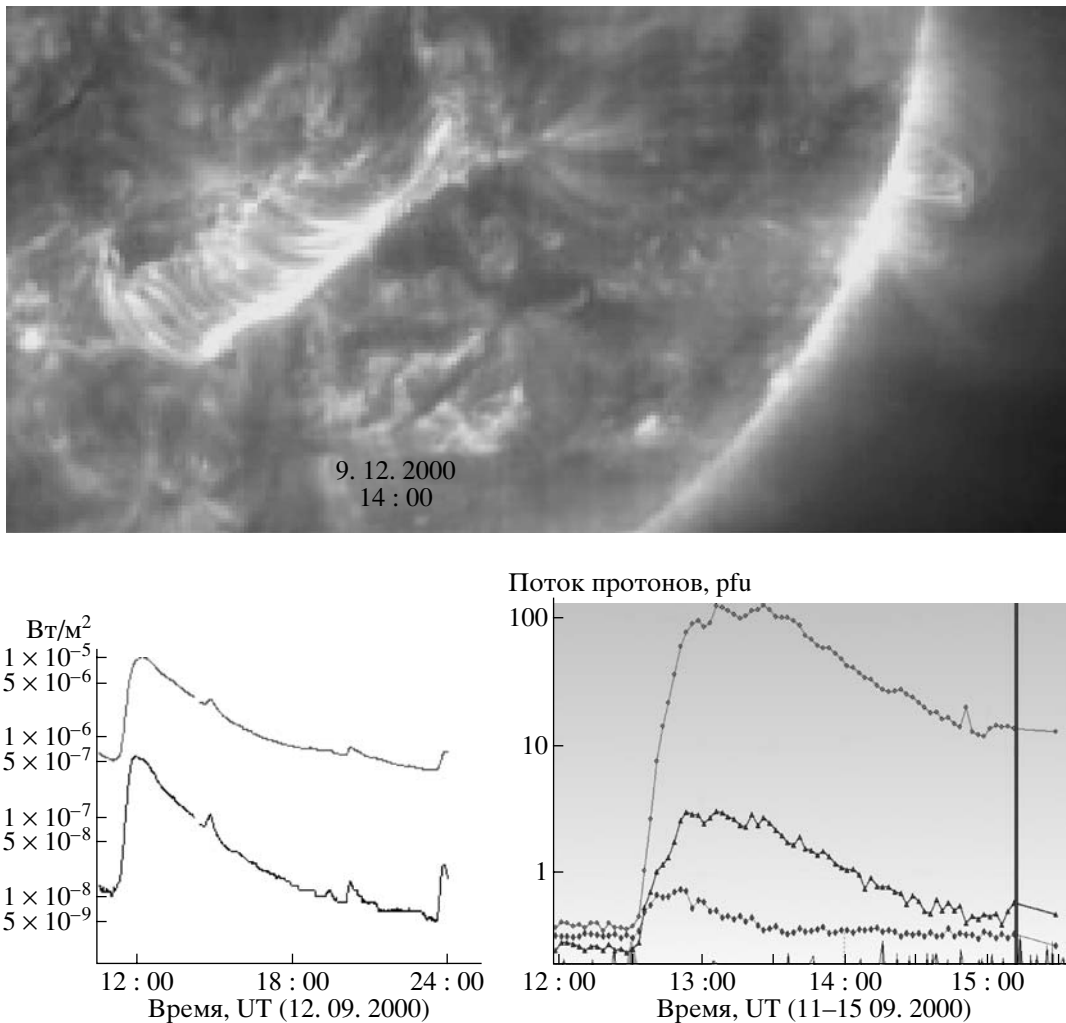


Рис. 4. Вверху — постэруптивная аркада 12 сентября 2000 г. в полосе около 195 \AA по данным спутника SOHO (как обычно, запад справа, север наверху). Внизу слева — кривые блеска вспышки в двух полосах $1-8 \text{ \AA}$ (верхняя кривая) и $0,5-4 \text{ \AA}$ (нижняя кривая) по данным спутника GOES-10. Внизу справа — регистрация потоков протонов в диапазонах $>10 \text{ МэВ}$, $>60 \text{ МэВ}$ и $>100 \text{ МэВ}$ (кривые сверху вниз) на спутнике IMP; по оси ординат указано начало суток 12–15 сентября.

электромагнитном излучении оказывается полезной для изучения процессов ускорения различных частиц. Заметим также, что ускоренные протоны прямо участвуют в формировании линейчатого излучения в гамма диапазоне (линии 2.223 МэВ и косвенно — некоторых “быстрых” линий тяжелых ядер). Вообще говоря, именно наблюдения жесткого излучения вспышек дают неопровержимую информацию о том, что эффективность ускорения частиц изменяется в очень широких пределах. Мощные солнечные гамма-всплески, такие как 25 августа 2001 г. (начало в $16:23 \text{ UT}$) и другие, сопровождающие самые большие вспышки, характеризуются потоками излучения в линии 2.223 МэВ , более чем на 2 порядка превышающими

значения, типичные для большинства ПВ нашей базы данных.

Только в редчайших случаях самого удачного прихода частиц к Земле регистрируются потоки протонов, в наименьшей степени ослабленные из-за условий выхода и распространения частиц. В качестве примера можно было бы назвать ПВ 4 ноября 2001 г., сопровождающее начавшуюся в $16:03 \text{ UT}$ вспышку X1.0/3B (6N, 18W) и характеризующуюся потоками протонов 31700 и 220 pfu в диапазонах энергий более 10 и 100 МэВ , соответственно. Разумеется, амплитуды наземных возрастаний солнечных космических лучей в какой-то степени характеризуют эффективность ускорения частиц, но судить по ним об этом трудно из-за проблем, связанных с распространением ча-

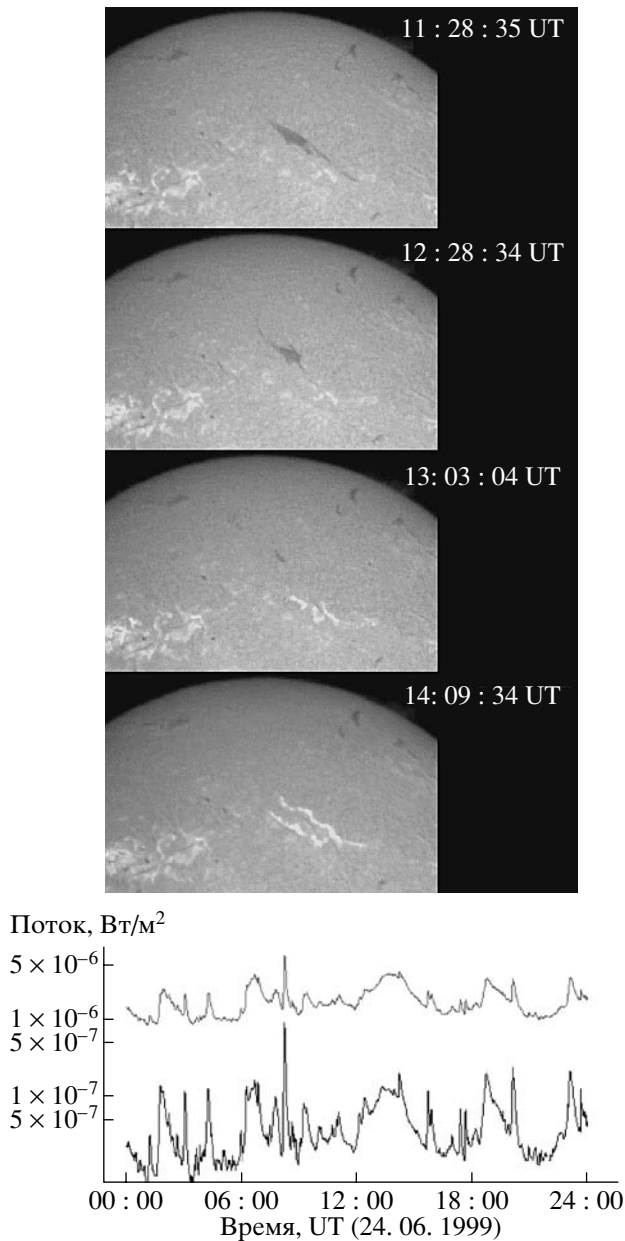


Рис. 5. Вверху — регистрация выброса волокна 24 июня 1999 г. в линии $H\alpha$ на Медонской обсерватории. Внизу — данные наблюдений спутника GOES-10.

стиц в короне и межпланетном пространстве. Таким образом, наблюдения жесткого рентгеновского и гамма-излучения вспышек можно использовать для оценки эффективности общего ускорения частиц в конкретном событии.

Кроме того, эти наблюдения могут быть полезны для изучения вопроса о структуре ядра вспышки. Рассмотрим здесь только один вопрос о размере петли, в которой развиваются высокоэнергичные явления во вспышках. Западные и восточные вспышки в данном случае могут изучаться как равноправные объекты.

Так же, как и в работе [5], мы используем здесь однородный материал спутника *Yohkoh*. Чтобы отвлечься от зависимости от энергетике конкретного события, будем, как и в предыдущем параграфе, рассматривать аналог спектров излучения, а не собственно их потоки в каком-либо диапазоне. Ниже эффективность ускорения частиц описывалась отношением скоростей счета двух инструментов широкополосного спектрометра (Wide Band Spectrometer) аппаратуры спутника *Yohkoh*: одного, работающего в жесткой рентгеновской области и другого — в гамма-диапазоне. Эти скорости счета HXS1 и GRS1 относились к диапазонам $E \geq$

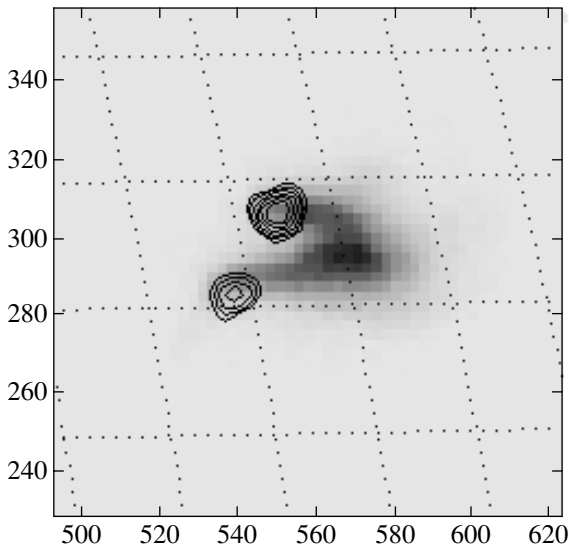


Рис. 6. Изображение вспышки 26 ноября 2000 г. по данным спутника YOHKOH. Фон снимка относится к мягкому рентгеновскому диапазону (телескоп SXT; 16 : 43 : 34 UT). Изофоты — яркость в диапазоне 53—93 кэВ в момент 16 : 43 : 41 UT. По осям отложены расстояния от центра диска в сек. дуги.

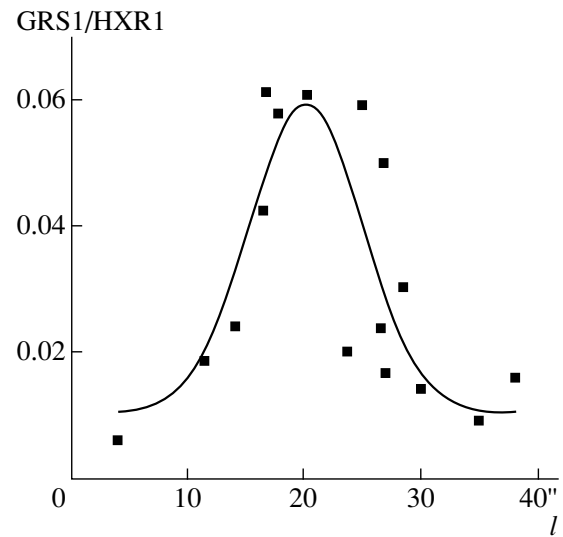


Рис. 7. Отношение интегральных скоростей счета (над фоном) гамма- и рентгеновского спектрометров аппаратуры WBS спутника YOHKOH в зависимости от расстояния между основаниями петель l , выраженного в сек. дуги. Сплошная линия — аппроксимация данных гауссианой.

≥ 30 кэВ и $E \geq 400$ кэВ. Фон здесь исключался, для отношения рассматриваемых довольно больших сигналов было несущественным некоторое изменение границ диапазонов в течение 8 лет работы спутника. Эти два сигнала дают некоторое представление об эффективности ускорения не только электронов, но и тяжелых частиц в достаточно мягком и релятивистском диапазонах. Об этом, в частности, свидетельствует корреляция потоков жесткого излучения и спектров с характеристиками приходящих ускоренных протонов для вспышек в западной части диска.

Для анализа мы использовали события из списка гамма-вспышек, зарегистрированных как рентгеновским, так и гамма-инструментами WBS. Для тех же событий жестким рентгеновским телескопом HXT Yohkoh были получены изображения в четырех энергетических диапазонах. Самый последний из них — канал H — относился к диапазону 53–93 кэВ. Для всех анализируемых событий, кроме одного, в канале H имелись эти изображения, одно из которых приведено на рис. 6 прямо из атласа данных. Это изображение относится к протонной вспышке 26 ноября 2000 г., которая началась около 16 : 30 UT в мягком рентгеновском диапазоне спутника GOES, характеризовалась баллом X4.0/2B (18N,38W) и длилась менее часа. Петля наиболее отчетливо видна в мягком рентгеновском диапазоне, а жесткое излучение, изофоты которого также показаны на рис. 6, как правило, концентрируются близ оснований петель.

Мы измерили расстояние между максимумами излучения в диапазоне 53–93 кэВ для 15 вспышек, располагавшихся как в западном, так и в восточном полушариях. Вспышки имели балл от M2 до X4, так что они уверенно регистрировались в интегральном канале гамма-спектрометра (GRS1). Далекие залимбовые явления нами не рассматривались. На рис. 7 отношение скоростей счета гамма- и жесткого рентгеновского спектрометров сопоставлено с этим расстоянием между основаниями петель для выбранных гамма-всплесков. На этом же рисунке приведена еще одна точка — значение этого отношения для мощных импульсных вспышек. Эта оценка сделана на основании спектров, полученных HXT Yohkoh, с небольшой экстраполяцией данных до энергий 400 кэВ.

Через все 16 точек была проведена гауссиана, также показанная на рис. 7; ее максимум располагается на $20.2''$, что соответствует примерно 15 тыс. км на Солнце. Несмотря на различие индивидуальных вспышек, этот не априорный результат свидетельствует о том, что петли гамма-вспышек характеризуются расстоянием между основаниями, заключенным в пределах от 10 до 20 тыс. км.

Заметим, что здесь в анализ включены вспышки, мощность которых не превышает X4. В настоящее время эта работа может быть продолжена по данным спутника RHESSI. Так для одной из вспышек M1.7 13 ноября 2003 г. соответствующий размер вспышечной петли во взрывной фазе

4 : 58–4 : 59 UT был близок к 20'' в самом жестком из анализируемых диапазонов 30–50 кэВ [13, рис. 4]. Для самых больших вспышек, особенно в диапазоне X10–X 30, размер петли превышает приведенные здесь значения, как это следует из нескольких регистраций различных лет. Это говорит о том, что основной очаг энерговыделения самых больших вспышек связан с областью противоположной полярности посредством гигантской арки.

Вывод о двух семействах размеров петель во вспышках слабее и мощнее X3–X5 находится в согласии с результатами изучения этого вопроса по данным о мягком рентгеновском излучении. В работе [2] (см. в этой работе последний рисунок, относящийся ко вспышкам M6–X3) это проявилось в существовании двух ветвей на корреляционной диаграмме связи температуры в источнике мягкого рентгеновского излучения с длиной петли. В жестких диапазонах гигантские постэруптивные арки проявляются, по-видимому, только в экстремально мощных явлениях.

Проведенное в этом разделе рассмотрение позволяет также прийти к определенным заключениям о роли “импульсивности” в развитии высокоэнергичных явлений. Можно привести много примеров, когда резкий подъем потока мягкого рентгеновского излучения был характерен для вспышек с наиболее эффективным ускорением: названные выше вспышки 25 августа 2001 г., 4 ноября 2001 г., а также 28 октября 2003 г. и др. Разумеется, для этих событий характерен мощный жесткий рентгеновский всплеск — прямой индикатор развития высокоэнергичных явлений.

С другой стороны, в некоторых вспышках, несмотря на медленный рост мягкого рентгеновского излучения в их начале, происходит эффективное ускорение. Однако в них, как, например, во вспышке в день Бастилии [9], резкий подъем рентгеновского излучения происходит в одном из последующих эпизодов и с необходимостью сопровождается эффективным ускорением частиц. Таким образом, использование такой характеристики, как импульсивность по мягкому рентгеновскому излучению всей вспышки, нецелесообразно. Соответствующий статистический вывод работ [1, 2] об уменьшении импульсивности в протонных вспышках должен быть уточнен с учетом пространственно-временной структуры мощных явлений.

Основным выводом этого раздела является выявление того факта, что для реализации эффективного ускорения частиц необходим определенный масштаб всего явления. В чисто импульсных событиях ускорение, по-видимому, происходит в очень низком источнике, с очень небольшими петлями.

Только при наличии связи этой точки с более удаленными местами с противоположной магнитной полярностью значительно увеличивается вероятность эффективного ускорения частиц и развития других высокоэнергичных явлений.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

В этой статье продолжается изучение каталога протонных событий. Основной вывод, полученный в [1, 2], о том, что вероятность возникновения протонного события определяется общей энергетикой вспышки, подтверждается и нашим рассмотрением. В отличие от [1, 2], мы анализируем не собственно потоки частиц в различных диапазонах, а спектр частиц, для грубого описания которого мы используем логарифм отношения максимальных потоков протонов с энергиями, превышающими 100 и 10 МэВ, или аналог интегрального спектра δ . Из базы данных по формальным критериям были отобраны 172 ПВ, связанные в основном со вспышками балла X. Чтобы ослабить влияние эффектов распространения частиц, мы включили в этот список солнечные явления в долготном интервале от 20E до западного лимба.

Распределение числа вспышек по величине δ имеет четко выраженный максимум (рис. 2). Оно близко к гауссовскому, с максимумом вблизи $\delta = -1.5$ и параметром $\sigma = 0.5$. Отклонение показателя спектра конкретных ПВ от приведенного значения δ связано с эффектами распространения частиц и некоторым различием условий в источнике их ускорения. Однако обнаружение выделенного спектра свидетельствует о единой природе основного механизма ускорения протонов в мощных солнечных вспышках.

Инвариантность спектра протонов большинства мощных вспышек свидетельствует, скорее всего, о существовании единого эффективного механизма ускорения частиц. Эта информация собственно об источнике ускорения частиц на Солнце полностью не дезавуируется различием процессов распространения частиц.

С другой стороны, современные наблюдения позволяют с определенностью утверждать, что процесс основного ускорения происходит практически в то же время и скорее всего в той же области, где развиваются основные процессы взрывной фазы вспышки. Есть наблюдательные аргументы в пользу того, что источник этого ускорения располагается достаточно низко, в области, непосредственно примыкающей к пятну. Соответствующие свидетельства этого собраны в работе [9] для вспышки в день Бастилии; этот вывод подтверждается детальным рассмотрением события 20 января 2005 г. [10], и в настоящее время его можно проиллюстрировать многими мощными

событиями. Дополнительные аргументы в пользу такой точки зрения появляются при анализе наблюдений в жестком рентгеновском и гамма-диапазонах, которые позволяют непосредственно видеть ту корональную петлю, в которой развиваются высокоэнергичные явления. Как проведенный в этой работе анализ данных HXT Yohkoh, так и появляющиеся данные RHESSI свидетельствуют о том, что эффективное ускорение происходит тогда, когда основной источник связан с областью противоположной магнитной полярности петель, размер которой сравним с доминирующим масштабом полей активной области. Необходимо, конечно, отметить, что обсуждаемые вспышки с эффективным ускорением частиц характеризуются очень большими потоками излучения на частотах, превышающих 30 ГГц, в чем можно непосредственно убедиться по данным, приведенным, например, в каталоге [3].

В распределении числа ПВ по δ существует определенный избыток более “мягких” событий. Для них величина δ коррелирует с введенной нами полной длительностью вспышек t_{wh} , характеризующей продолжительность существования вспыхивающих постэруптивных петель. Это указывает на связь ускорения частиц в этих событиях с развитием постэруптивных явлений. Свойства потоков этих “мягких” событий, ассоциируемых с длительными вспышками, непрерывно переходят в характеристики еще более “мягких” явлений, которые уже не регистрируются в диапазоне энергий более 100 МэВ и чаще всего связаны с выбросами волокон на Солнце.

Корреляция, приведенная на рис. 3, и анализ множества ПВ в мягком диапазоне спектра дают определенные указания на то, что на постэруптивной фазе происходит дополнительное ускорение протонов. В настоящее время еще недостаточно данных для того, чтобы выбрать между двумя возможностями — ускорением в располагающемся высоко в короне токовом слое или на фронте ударной волны, уходящей из короны в межпланетное пространство. Эта проблема обсуждается уже не один десяток лет. На связь ПВ с мягким спектром в диапазоне десятков МэВ с постэруптивным ускорением указывалось в [14–16]. В этих работах было обнаружено также, что такие события характеризуются, в частности, относительно мягким частотным спектром микроволнового радиоизлучения (≤ 5 ГГц). Сейчас серьезным аргументом в пользу ускорения частиц на больших высотах служат детальные наблюдения коронального источника рентгеновского излучения до энергий около 50 кэВ во многих событиях, зарегистрированных, в основном, на спутнике RHESSI [17]. Естественно предположить, что вместе с электронами в высоком корональном токовом слое ускоряются и

протоны, но, вероятно, до не слишком больших энергий.

Обобщая вышеизложенное, мы приходим к такому выводу: в конкретном мощном событии ускорение протонов происходит как в “низком”, так и в “высоком” источниках, которые действуют не совсем одновременно. В большинстве мощных вспышек на Солнце влияние первого источника доминирует, и именно он определяет потоки частиц в рассматриваемых диапазонах энергий протонов. Спектр возникающих частиц меняется мало при переходе от одного из этих явлений к другому, так что серьезные причины его изменения при распространении потоков в короне и межпланетном пространстве не приводят к полному исчезновению этой информации в наблюдениях на околоземных орбитах. В тех редких случаях, когда по тем или иным причинам влияние взрывного ускорения ослаблено, действие ускорения на постэруптивной фазе проявляется более отчетливо. Полностью оно ответственно за появление ускоренных частиц во вспышках без взрывной фазы или в процессах исчезновения волокон. Поскольку при этом частицы ускоряются лишь до энергий в 10–30 МэВ, влияние второго механизма в явлениях различной мощности приводит к смягчению суммарного спектра.

Отметим, однако, что корональный выброс массы приводит к открытию части магнитной конфигурации и облегчению тем самым выхода ускоренных частиц из ловушек в петлях активной короны. Существуют несколько аргументов, говорящих в пользу именно дополнительного ускорения частиц на постэруптивной фазе, а не облегчения условий выхода частиц при развитии обсуждаемого длительного процесса. Основным здесь является то, что рис. 3 существенен не только сам по себе, а тем, что он соединяет две большие популяции событий. Первая из них — это мощные вспышки, большинство из которых описывается основным распределением Гаусса. Часть из них имеют полные длительности t_{wh} , не превышающие 2–3 ч, и чаще всего они отождествляются с компактными вспышками. Физически они отличаются от обычных мощных вспышек тем, что дополнительного длительного поступления энергии в верхнюю часть постэруптивных петель в них не происходит, и плазма свободно высвечивается. Вторая популяция — это нестационарные явления, в большинстве своем связанные с выбросом волокон. Соответствующие ПВ, как правило, регистрируются в области энергий свыше 10 МэВ, при этом обнаружимый сигнал отсутствует при больших энергиях. Большинство из них длится долго — величина t_{wh} значительно превышает 6–7 ч. Иначе говоря, в 15 событиях, представленных на рис. 3, проявляется действие обоих источников ускорения частиц, тогда

как в указанных популяциях доминирующим является тот или иной из них.

Здесь существенно подчеркнуть, что появление в ходе развития мощной вспышки одного или нескольких импульсов — взрывной фазы в начале или через некоторое время спустя — приводит к формированию типичного жесткого спектра ускоренных протонов. Если очагов такого взрывного развития нет, то спектр остается мягким, характерным для сотен корональных явлений, уже наблюдающихся с конца 70-х годов.

Разумеется, вышесказанное не означает, что мы полностью отрицаем влияние облегчения условий выхода ускоренных частиц в событиях с развитой постэруптивной фазой. Наряду с указанным фактом раскрытия магнитной конфигурации больша́я протяженность этих явлений вдоль нейтральной линии поля (чаще — по долготе) способствует корональному распространению частиц и их попаданию в область оснований различных силовых линий магнитного поля, выходящих затем в межпланетное пространство. Поэтому нам представляется важным отмеченное в [18] обстоятельство — присутствие в высокоширотных областях гелиосферы, где работал спутник *Ulysses*, после вспышки 12 сентября 2000 г. примерно такого же количества ускоренных протонов, как и около плоскости эклиптики. Такое наблюдалось редко, и в [18] подчеркивается выделенность этого события. Точка, относящаяся к этому явлению, располагается в центре на рис. 3, и в каком-то смысле это событие является наиболее типичным для всех 15 промежуточных случаев, представленных на этом рисунке. Более детальное обсуждение этих проблем выходит за рамки данной статьи.

На первом этапе выполнения этой работы мы занимались уточнением некоторых выводов, полученных в [1, 2], в частности, относящихся к зависимостям характеристик потоков ускоренных частиц от длительности вспышек t_{GOES} . Для большинства мощных вспышек прослеживается некоторая зависимость потока частиц в обоих диапазонах от t_{GOES} , которая в основном отражает сильную связь потоков с общей энергетикой явления. Последовательное развитие этого направления позволяет по-другому взглянуть на полученные в статье результаты. А именно потоки частиц в обсуждаемых энергетических диапазонах статистически зависят от балла вспышки и более слабо зависят от ее длительности. Условно это можно выразить как

$$F_{100,10} \sim I \cdot t_{\text{GOES}}^\alpha,$$

где I — рентгеновский балл вспышки, а показатель степени α — величина близка к 0.2 в обоих диапазонах. Иначе говоря, сами величины F_{100} и F_{10} зависят от длительности t_{GOES} , но очень слабо, особенно если каким-то образом учесть сильную

зависимость их от балла. Отношение F_{100}/F_{10} фактически от балла вспышки не зависит, и при введении нового параметра — полной длительности вспышки t_{wh} — удастся прояснить постепенное изменение спектра, его смягчение и переход к ПВ без жесткой их составляющей. Так что логическое развитие этого направления также приводит к сформулированным выше результатам.

Отметим также, что наше рассмотрение несколько дополняет проведенное в [1, 2] изучение размеров вспышечных петель. Появившиеся возможности получения изображений в более жесткой области спектра дают возможность исследовать энергетическое ядро вспышки и подчеркивают, что эффективное ускорение частиц реализуется только в случае достаточно большого масштаба тех магнитных полей, которые ответственны за развитие рассматриваемых нестационарных процессов.

В статье мы сознательно ограничились рассмотрением наблюдательного аспекта всей этой сложной проблемы. Разумеется, большой интерес представляет выяснение самих механизмов ускорения частиц. Результаты [1, 2] и их развитие в настоящей статье показывают, что механизмы взрывного и постэруптивного ускорения могут сильно отличаться друг от друга, демонстрируя много общих черт в каждом отдельном событии. Ясно, что взрывное ускорение реализуется в области сильных полей, в условиях их изменений в низко расположенной области, занятой разреженной корональной плазмой.

Механизм самого процесса остается загадочным. С другой стороны, постэруптивное ускорение происходит либо в “вертикальном” токовом слое пересоединяющихся магнитных силовых линий, либо на фронте корональной ударной волны. Из наблюдений окончательный выбор между двумя этими возможностями пока сделать не удается.

Нам представляется, что вышеизложенные результаты будут полезны для развития теоретических аспектов и выяснения механизмов ускорения частиц во вспышках.

Авторы благодарят А.Б. Струминского и И.М. Чертка за обсуждение.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (код проекта 05-02-17105) и Министерства образования и науки РФ (грант НШ-7495.2006.2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. В. Белов, Э. Гарсия, В. Г. Курт, Е. Мавромичалаки, Космич. исслед. **43**, 171 (2005).
2. A. Belov, H. Garsia, V. Kurt, H. Mavromichalaki, and M. Gerontidou, *Solar Phys.* **229**, 135 (2005).
3. A. I. Sladkova, G. A. Bazilevskaya, V. A. Ishkov, *et al.*, *Catalogue of Solar Proton Events 1987–1996*, ed. Yu.I. Logachev (Moscow University Press, 1998).

4. D. H. Pearson, *et al.*, *Astrophys. J.* **336**, 1050 (1989).
5. М. А. Лившиц, А. Р. Осокин, А. Н. Шаховская, *Изв. РАН, сер. физ.* **70**, 1463 (2006).
6. А. Н. Шаховская, М. А. Лившиц, И. М. Черток, *Астрон. журн.* **83**, 1128 (2006).
7. S. W. Kahler, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* **30**, 113 (1992).
8. D. V. Reames, *Space Sci. Rev.* **90**, 413 (1999).
9. М. А. Лившиц, А. В. Белов, *Астрон. журн.* **81**, 732 (2004).
10. V. V. Grechnev, V. G. Kurt, I. M. Chertok, *et al.*, *Solar Phys.* (2006, в печати).
11. М. А. Лившиц, О. Г. Бадалян, *Астрон. журн.* **81**, 1138 (2004).
12. A. H. McAllister, M. Dryer, P. McIntosh, *et al.*, *Geophys. J. Res.* **101**, 13497 (1996).
13. W. Liu, S. Liu, Y. W. Jiang, and V. Petrisian, *Astrophys. J.* **649**, 1124 (2006).
14. I. M. Chertok, in: *Proc. of the 24th Intern. Cosmic Ray Conf.*, Rome, 1995, v. 4 (International Union of Pure and Applied Physics, 1995), p. 78.
15. I. M. Chertok, *J. Moscow Phys. Soc.* **7**, 31 (1997).
16. Г. А. Базилевская, А. И. Сладкова, В. В. Фомичев, И. М. Черток. *Астрон. журн.* **67**, 409 (1990).
17. R. Brian, B. R. Dennis, R. P. Lin, *et al.*, *Astrophys. J.* **646**, 605 (2006).
18. A. Struminsky, B. Heber, M.-B. Kallenrode, *et al.*, *Adv. Space Res.* **38**, 507 (2006).

SOURCES OF EFFICIENT ACCELERATION OF SOLAR-FLARE PARTICLES: OBSERVATIONAL ASPECTS

A. R. Osokin, M. A. Livshits, and A. V. Belov

This work continues earlier statistical analyses of cataloged proton events in cosmic rays. The spectra of proton enhancements identified from the logarithm of the ratio of the proton fluxes with energies exceeding 100 and 10 MeV, $\delta = \log(F_{100}/F_{10})$, are studied, focusing on 172 powerful events with favorable conditions for escaping from the corona, with their subsequent propagation in interplanetary space. The δ distribution for the flares is Gaussian, with a comparatively weak spread in δ . The distribution maximum corresponds to an excess of the 10 MeV flux over the 100 MeV flux by a factor of 30. This spectrum supports the idea that both soft and hard protons are efficiently accelerated, probably by a single mechanism that operates during the explosive phases of the flares. The sizes of the loops of M2–X4 flares observed by the Yohkoh Hard X-Ray Telescope at energies exceeding 50 keV indicate low heights for the main acceleration regions. There is some excess over the Gaussian distribution for “softer” events. Some post-eruptive phenomena can be clearly distinguished in these events, and they display a correlation between δ and the total flare duration. Thus, there are two sources of particle acceleration operating at low and high altitudes during the explosive and post-eruptive phases of solar flares, respectively. The second source, which is manifest through some prolonged flares and filament-ejection phenomena, accelerates protons only to energies of 10–30 MeV.