

УДК 523.987:524.1

КОГДА И ГДЕ НАИБОЛЕЕ ЭФФЕКТИВНО УСКОРЯЮТСЯ СОЛНЕЧНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ?

© 2004 г. М. А. Лившиц, А. В. Белов

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн, Троицк, Россия

Поступила в редакцию 25.09.2003 г.; принята в печать 15.03.2004 г.

Рассматривается проблема ускорения частиц в солнечных вспышках с экстремально высокими потоками протонов с энергиями, превышающими 100 МэВ. Прежде всего, определяется положение источника этого ускорения во вспышке 14 июля 2000 г. в предположении, что время ускорения совпадает со всплеском жесткого линейчатого и непрерывного гамма-излучений. Начало этого явления соответствует моменту 10 : 19 UT, когда на Солнце по данным космической обсерватории TRACE одна из лент вспышки достигла большого пятна группы. Обсуждаемый промежуток времени 10 : 20–10 : 28 UT развития вспышки согласуется с началом протонного ускорения на Земле. Для данной вспышки оценка показывает, что высота области эффективного ускорения примерно в 2–3 раза больше той высоты (около 7000 км), где обычно начинается жесткий рентгеновский импульс. Далее полученные результаты обобщаются для 28 мощных вспышек с особо эффективным ускорением релятивистских частиц, в частности, для детально изученных событий 15 июня 1991 г., 24 мая 1990 г., и сравниваются с результатами статистического анализа более 1100 возрастных потоков протонов. Эффективное ускорение частиц связано, по-видимому, с мощными импульсными эпизодами проанализированных больших вспышек. Полученные результаты свидетельствуют в пользу существования в этих событиях, кроме источников локального (как в импульсных вспышках) и постэруптивного ускорения, дополнительного чрезвычайно эффективного “ускорителя” среднего масштаба в разреженных областях с достаточно большими значениями магнитных полей и их градиентов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема ускорения частиц является самой сложной в физике солнечных вспышек. Присутствие ускоренных электронов обнаруживается в импульсных явлениях по нетепловому характеру спектра в области от 10–15 до 100 кэВ. Обширный материал об ионах, ускоряющихся во время солнечных вспышек, получен за последние 50 лет путем непосредственной регистрации потоков частиц на Земле и в межпланетном пространстве. Каталоги протонных событий включают все возрастания потока частиц в области энергий свыше нескольких или 10 МэВ; при этом нижний предел обнаружимости явления в области малых энергий меняется от 0.01 до одной частицы через квадратный сантиметр в секунду встерадиане в период глубокого минимума и максимума солнечной активности, соответственно. Самая большая протонная активность за последние 40 лет, для которых имеются необходимые данные, наблюдалась в XXII солнечном цикле [1]. Несмотря на многочисленность регистрации протонных событий, вопрос о механизме и источниках ускорения частиц до сих пор остается нерешенным.

В последние десятилетия в понимании ускорения появились определенные указания в поль-

зу того, что частицы с энергиями 10–80 МэВ ускоряются ударной волной, формирующейся при корональных выбросах массы (СМЕ). В решение этого вопроса существенный вклад внесли Д. Римс, С. Кэйлер и О. Сир (D. Reams, S. Kahler, O.C. St.Syr). В этой статье рассматриваются более энергичные частицы — протоны с энергией более 100 МэВ (и соответственно электроны с энергиями более 50 кэВ), которые для краткости называются релятивистскими вследствие того, что при анализе их движения уже нельзя пренебрегать теорией относительности.

Еще несколько лет тому назад было модно распространять такой взгляд — ускорение на ударной волне — на релятивистские частицы, в частности, протоны вплоть до энергий 1 ГэВ и более, т.е. и на солнечные космические лучи (СКЛ), наблюдаемые наземными детекторами. Однако со временем такой подход стал противоречить новым результатам как непосредственно наблюдений высокоэнергичных явлений, так и их теоретической интерпретации. В ряде случаев, например, основная ударная волна формируется заметно позже момента, когда частицы самых высоких энергий покидают Солнце и через примерно 15–20 мин уже регистрируются на Земле. Трудным также оказывается объяснить

ускорение частиц до энергий, превышающих 1 ГэВ, на тех ударных волнах, физические условия на фронтах которых фиксируются в наблюдениях радиовсплесков II рода в короне и межпланетном пространстве.

Как известно, наземные возрастания интенсивности космических лучей (Ground Level Enhancement — GLE) связаны, как правило, с самыми мощными вспышками. Часто они происходят в больших группах пятен или комплексах активности, и поэтому близ максимума солнечной активности в некоторых случаях при прохождении этой группы по диску последовательно наблюдаются несколько GLE. Эти частицы чаще всего приходят к Земле от мощных вспышек, происходящих в западной части диска в области долгот $+20^\circ \dots +75^\circ$, хотя достаточно много таких событий связано с центральными вспышками, а также с процессами близ западного лимба или за ним. Амплитуда GLE, форма временного профиля и энергетического спектра чувствительны к долготе, на которой происходит порождающее GLE явление на Солнце. В наземных наблюдениях СКЛ иногда присутствуют два максимума. Первый из них характеризуется высокой анизотропией: число приходящих вдоль силовой линии магнитного поля частиц от Солнца заметно превышает поток из других направлений. Спектр частиц, приходящих прямо от Солнца, оказывается более жестким, чем приходящих позже с различных направлений. Возрастание, регистрируемое на конкретной станции космических лучей, зависит от ее геомагнитной широты, и может изменяться от долей процента до нескольких тысяч процентов.

Спектры протонов, наблюдавшихся на Земле и на околоземных орбитах, приведены на рис. 1 для моментов максимума наибольших возрастаний интенсивности солнечных космических лучей в XXII цикле [2]. Предполагается, что эти спектры близки к спектрам эмиссии частиц из источника ускорения. Самый жесткий спектр СКЛ продемонстрировала залимбающая вспышка 29 сентября 1989 г. Обратим внимание на то, что спектр протонов в области энергий около 1 ГэВ при короткой мощной вспышке 24 мая 1990 г. практически совпал со спектрами мощных длительных вспышек в комплексах активности. Энергия протонов в некоторых из этих событий превышала 10 ГэВ. Число протонов с энергией свыше 30 МэВ, ускоренных за время всей продолжительности приведенных на рис. 1 вспышек, превышает значение 2×10^{33} .

Из временного профиля интенсивности СКЛ можно получить некоторую информацию о частицах, покидающих Солнце. Начиная с 60-х годов XX в., это проводилось на основе модели диффузионного распространения высокоэнергичных протонов. Для последних лет при этом удается

Поток, протон/см² с ср МэВ

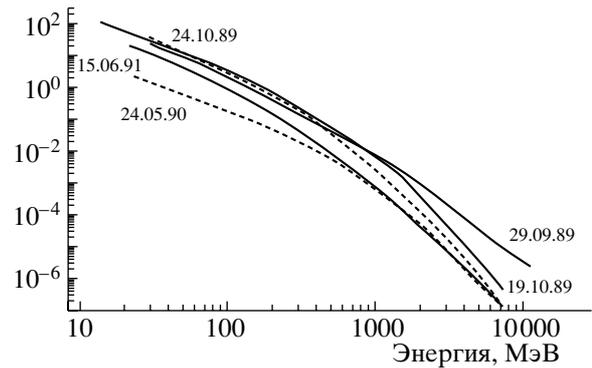


Рис. 1. Спектры протонов, наблюдавшихся на Земле и на околоземной орбите, для моментов максимума наибольших возрастаний космических лучей в XXII цикле. Самый жесткий спектр солнечных космических лучей продемонстрировала залимбающая вспышка 29 сентября 1989 г.

использовать дополнительную информацию о процессе ускорения, например, о длительности ускорения протонов, которая получается из временного профиля интенсивности γ -излучения, связанного с распадом π^0 -мезона. В [3] для нескольких вспышек XXII цикла временной ход интенсивности солнечных протонов с $E \leq 100$ МэВ аппроксимировался диффузионной моделью распространения СКЛ путем подбора функции инжекции протонов на Солнце. При вспышках на диске основное ускорение происходит во время существования жесткого γ -всплеска (около 10–20 мин). Особенности временного профиля СКЛ в [3] связываются с еще одной или двумя фазами ускорения релятивистских частиц. О такой возможности свидетельствуют указания на присутствие длительного γ -излучения мощных вспышек [4]. Однако подобрать однозначную модель ускорения релятивистских протонов на пути усложнения простейшей диффузионной модели не представляется возможным.

Вообще говоря, можно допустить, что в течение одной и той же вспышки релятивистские протоны ускоряются неоднократно и разными механизмами. Это может быть как ускорение в импульсе около пятен, так и в вертикальном токовом слое на постэруптивной фазе процесса, а иногда при взаимодействии корональных петель. Можно в принципе построить детальную модель, описывающую наблюдения, но трудно рассчитывать на то, что она будет адекватна действительности. Фактическое отсутствие какого-либо прогресса в понимании механизма ускорения релятивистских частиц на Солнце после 80-х годов — эпохи работы спутника SMM (см. обзор [5]) — связано не только с недостатком наблюдений самых высокоэнергичных частиц и жесткого γ -излучения больших вспышек.

Целью данной статьи явилось рассмотрение проблемы ускорения частиц, по возможности без использования априорных предположений как о механизмах ускорения, так и о характере источника. Сейчас надежно известно, что во многочисленных вспышках — источниках жестких рентгеновских всплесков — электроны ускоряются до энергий, превышающих десятки кэВ. Это происходит в одном или нескольких эпизодах импульсной и взрывной (flash) фаз, и в большинстве случаев источник располагается низко, в очень небольшой области близ пятен. Будем называть этот случай локальным ускорением. В некоторых случаях, особенно на постепенной фазе вспышки, когда применима модель Коппа-Пноймана, по видимому происходит ускорение частиц в вертикальном токовом слое, которое будем называть постэруптивным. Сейчас складывается впечатление, что названные две возможности — локальное и постэруптивное ускорение в области энергий протонов выше 100 МэВ (где ускорением на ударной волне можно пренебречь) — не могут объяснить количество и спектры частиц в наблюдаемых явлениях с максимальными потоками релятивистских частиц. Действительно, в очень небольшом источнике импульсного ускорения частиц трудно ускорить значительное количество частиц с энергиями в несколько сотен МэВ. Известно также, что этот источник располагается около пятен в области сильных замкнутых магнитных полей, и поэтому выход частиц из такого источника крайне затруднен. Для постэруптивной стадии характерно ускорение в области слабых магнитных полей, медленно изменяющихся в пространстве, что неблагоприятно для эффективного ускорения релятивистских частиц. Кроме того, в нескольких случаях имеются прямые наблюдательные свидетельства того, что большие потоки высокоэнергичных частиц достигают Земли тогда, когда большая часть постэруптивных явлений на Солнце еще не наблюдалась. Эти соображения послужили для нас стимулом для первого изучения выделенной группы явлений с экстремально высокими потоками релятивистских частиц. Физически проблема состоит в том, существует ли в этих событиях дополнительный источник чрезвычайно эффективного ускорения частиц и если да, то каковы его свойства.

Такая постановка задачи определяла выбор материала и метод его рассмотрения. Ниже прежде всего уточняется список тех вспышек, в которых ускорение частиц до релятивистских энергий происходит наиболее эффективно. Здесь используются не только данные о прямой регистрации частиц, но и данные о радио и γ -излучении. Затем подробно обсуждается вопрос об отождествлении источника ускорения релятивистских частиц во время хорошо изученной вспышки 14 июля 2000 г. Отдельный раздел содержит ретроспективный взгляд на все

события, начиная с 1956 г., с самыми большими потоками протонов с $E \geq 100$ МэВ с использованием тех возможностей, которые предоставляют современные наблюдения для хорошо изученных мощных явлений. В заключение суммируются результаты морфологического изучения вспышечного ускорения частиц в самых мощных событиях.

2. ВСПЫШКИ С НАИБОЛЕЕ ЭФФЕКТИВНЫМ УСКОРЕНИЕМ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЧАСТИЦ

Анализ накопленных данных о самых мощных солнечных вспышках наводит на мысль о том, что существуют явления с аномально высокой эффективностью процесса ускорения. Некоторые указания на это содержатся в результатах прямой регистрации заряженных частиц и нейтронов, когда общее или максимальное число частиц на порядок превышает среднее значение для данного класса явлений. До сих пор такие события просто отождествляли с GLE. Число GLE с начала их измерений в 1942 г. сейчас приблизилось к 70. Только в последние годы становится ясно, что отождествление явлений с высокой эффективностью ускорения и GLE не совсем точно. Это связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, вероятность регистрации GLE сильно зависит от положения вспышки относительно Земли. Поэтому даже не самые мощные вспышки дают заметный эффект, если они располагаются в наиболее благоприятной для наблюдений с Земли зоне солнечной поверхности, и, наоборот, эффект пренебрежим для вспышек, удаленных далеко к востоку от центрального меридиана. Во-вторых, нейтронные мониторы чувствительны к самым жестким частицам с $E \geq 1$ ГэВ, в результате чего события с жестким спектром регистрируются предпочтительнее по сравнению с другими событиями с одним и тем же числом релятивистских частиц. Эти причины привели к тому, что в список GLE вошли как вспышки с самой высокой эффективностью генерации релятивистских частиц, так и примерно столько же обычных мощных событий, не выделяющихся по средним потокам протонов с $E \geq 100$ МэВ.

В данной работе использована база данных рентгеновских вспышек, дополненная однородными материалами о потоках протонов с энергиями $E \geq 10, 60$ и 100 МэВ. Из этого массива данных о более чем 1000 протонных вспышках 1976–2003 г. выбраны случаи с потоками протонов с $E \geq 100$ МэВ, превышающими $100 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ около Земли. Таких событий оказалось только 12. Для этих мощных вспышек условия выхода релятивистских частиц из солнечной короны позволили им достичь околоземного пространства, и поток протонов с $E \geq 100$ МэВ превысил указанный предел.

Во многих случаях потоки релятивистских частиц, приходящие к окрестности Земли, ослаблены вследствие того, что вспышка располагалась вне оптимального долготного интервала $-20^\circ \dots +90^\circ$. Здесь для выявления эффективности ускорения мы использовали косвенные данные, главным образом, поток радиоизлучения на частоте 15.4 ГГц и интенсивность жесткого γ -всплеска. Эти данные собраны в каталоге протонных событий [1], работе [4] и некоторых других работах. В частности, мы проанализировали все события с максимальными потоками на частоте 15.4 ГГц, превышающими 2×10^4 с.е.п. Это рассмотрение позволяет в первом приближении оценить потоки релятивистских частиц на Солнце для восточных вспышек, для которых прямые измерения искажены эффектами распространения. Для вспышек последних XXII и XXIII циклов обширный наблюдательный материал позволяет с достаточной достоверностью выделить интересующие нас события — вспышки июня 1991 г. и другие, включая некоторые случаи, когда непосредственная регистрация потока релятивистских протонов в области 100 МэВ была затруднена, а также событие с максимальным количеством зарегистрированных нейтронов 24 мая 1990 г. В окончательный массив данных мы включили также несколько мощных вспышек предыдущего XXI цикла, хотя эффективность ускорения релятивистских частиц в них была несколько меньше эффективна по сравнению с наиболее мощными вспышками XXII цикла.

Заметим, что оценку ослабления потока релятивистских протонов при удалении источника от оптимальной долготной зоны можно дать также на основе статистических результатов, приведенных, например, для GLE в работе [6]. В данном случае статистика основана примерно на 50 GLE и нескольких сотнях протонных вспышек и при этом на одновременных измерениях одного события на нескольких КА, расположенных в удаленных точках межпланетного пространства (см. обзор [7]). Использование этого подхода для небольших удалений от оптимальной долготной зоны приводит к оценке, близкой к полученной нами по косвенным данным, однако при больших удалениях вспышки на восток от центрального меридиана использование этих “статистических” результатов становится малоэффективным.

Наше рассмотрение также показывает, что оценка общей эффективности ускорения релятивистских частиц по потоку протонов с $E \geq 100$ МэВ значительно слабее зависит от спектра ускоренных частиц, чем аналогичная оценка по более энергичным частицам, вызывающим GLE.

Окончательный результат приведен в таблице, где для 28 вспышек приведены: дата, время начала

вспышки, рентгеновский балл, полная длительность dt и отдельно время роста мягкого рентгена dt_1 (обе величины непосредственно по базе данных спутников GOES), оптический балл, широта и долгота вспышки (положительные значения относятся к северу от экватора и к западу от центрального меридиана, соответственно). Потоки частиц в околоземном пространстве приведены для энергий $E \geq 10, 60$ и 100 МэВ. В примечаниях указано только наличие GLE.

Заметим, что если бы не временные ограничения, полный список таких явлений должен включать также несколько вспышек 40-х годов, известную вспышку 23 февраля 1956 г., мощные вспышки августа 1972 г. Кроме того, в окончательную таблицу не вошли несколько мощных вспышек, произошедших на восточном лимбе, например, 1 июня 1991 г., так как для них информации о процессах ускорения, особенно на низких высотах, было недостаточно. Проведенное рассмотрение позволяет заключить, что экстремально эффективное ускорение релятивистских частиц за последние примерно 30 лет происходило почти в таком же количестве случаев, как и число GLE. Однако наша выборка включает самые мощные вспышки, вызывающие GLE — это примерно половина нашего списка; вторая половина списка — это вспышки с примерно такой же эффективностью ускорения релятивистских частиц, произошедшие в восточной части диска Солнца.

До изложения основного содержания сделаем два общих замечания относительно исследования явлений, приведенных в таблице. Во время многих вспышек не очень большой мощности ускорение частиц происходит в одном из всплесков импульсной фазы или непосредственно после нее. Этот момент времени близок к тому моменту, когда производная потока мягкого рентгеновского излучения достигает максимума. Для некоторых мощных явлений, приведенных в таблице, это также справедливо. Однако нередко наиболее мощные события представляют собой несколько последовательных эпизодов, и в некоторых из них могут ускоряться частицы. Ниже будут обсуждаться эпизоды наиболее эффективного ускорения в каждом из рассматриваемых событий.

Кроме того, в последние годы для некоторых вспышек появились детальные данные о жестком гамма-излучении. Они показывают, что непрерывное излучение электронов в области 1–10 МэВ возникает одновременно с континуумом в области 60–100 МэВ, связанным с распадом π^0 -мезонов и линейчатым излучением ядер. В тех случаях, когда возможности наблюдений позволяли провести такой анализ больших вспышек, этот вывод был справедлив: вспышки 26 марта 1991 г.

Данные о вспышках и потоках частиц

Дата вспышки	Время UT	Рентге- новский балл	dt , мин	$dt1$, мин	Опти- ческий балл	Широ- та град.	Долго- та град.	Поток протонов, $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1}$			Приме- чания
								$E >$ > 10 МэВ	$E >$ > 60 МэВ	$E >$ > 100 МэВ	
1978.09.23	9:47	X1.0	43	42	3B	35	50	1000	159	48.3	GLE
1981.10.12	6:22	X3.1	55	14	2B	-18	-30	590	84.8	26.27	GLE
1982.06.03	11:41	X8.0	105	7	2B	-9	-72	30	0.89	0.283	
1982.06.06	16:30	X12.0	162	24	3B	-9	-25	15	1.76	0.332	
1982.07.09	7:31	X9.8	53	7	3B	17	-73	38	2.2	0.2	
1982.12.07	23:36	X2.8	71	18	1B	-19	79	900	111	56.1	GLE
1984.04.24	23:56	X13.0	104	5	3B	-12	-43	1110	224	5.51	
1989.08.12	13:57	X2.6	134	27	2B	-16	37	6000	875	237	GLE ?
1989.08.16	1:08	X20.0	80	9	2N	-18	84	1500	171	83.7	GLE
1989.09.29	10:47	X9.8	228	46		-30	90	4500	696	559	GLE
1989.10.19	12:29	X13.0	464	26	4B	-27	-10	2500	690	400	GLE
1989.10.22	17:08	X2.9	240	49	2B	-27	31	4450	811	380	GLE
1989.10.24	17:36	X5.7	528	55	3B	-30	57	5000	398	272	GLE
1990.05.21	22:12	X5.5	87	5	2B	35	36	276	67.1	30.9	GLE
1990.05.24	20:46	X9.3	59	3	1B	33	78	96	25	20	GLE
1991.03.22	22:43	X9.4	34	2	3B	-26	-28	10000	866	257	
1991.06.04	3:37	X12.0	233	15	3B	30	-70	43	4.96	3.522	
1991.06.06	0:54	X12.0	81	18	4B	33	-44	150	25.2	4.78	
1991.06.09	1:37	X10.0	167	3	3B	34	-4	30	5.1	1.94	
1991.06.11	2:09	X12.0	71	20	3B	31	17	2300	317	95.2	GLE
1991.06.15	6:33	X12.0	284	118	3B	33	69	950	124	116	GLE
1992.11.02	2:31	X9.0	57	37	2B	-23	90	630	108	24.1	GLE
1997.11.06	11:49	X9.4	12	6	2B	-18	63	490	109	78.1	GLE
2000.07.14	10:03	X5.7	40	21	3B	22	7	7000	1200	623	GLE
2000.11.08	22:42	M7.4	83	46	3F	10	77	14800	1580	451	halo NW
2001.04.15	13:19	X14.4	36	31	2B	-20	85	951	223	250	GLE
2001.09.24	9:32	X2.6	97	66	2B	-16	-23	12900	100	20	
2001.11.04	16:03	X1.0	54	17	3B	6	18	31700	200	220	GLE

(ГАММА-1) [8], 24 мая 1991 г. (ГРАНАТ, прибор ФЕБУС) [9], 24 ноября 2000 г. (≈ 15 UT, Yohkoh) [10] и некоторые другие, для которых наблюдения не так полны. На рис. 2 приведен наблюдаемый и вычисленный спектр вспышки 26 марта 1991 г. фотонов высокой энергии [11, 12]. В области $h\nu \geq 100$ МэВ распад π -мезонов, возникающих в результате ядерных реакций ускоренных протонов

с фоновыми частицами, обеспечивает наблюдаемое высокоэнергичное излучение. Совпадение начала свечения электронной и протонной компонент регистрируется с точностью от нескольких до десятка секунд. В частности, для вспышки 26 марта 1991 г. можно утверждать, что одновременно произошло ускорение электронов и протонов с энергиями до 120 МэВ и до 300 МэВ, соответственно. Итак,

имеются основания считать, что релятивистские электроны и ионы ускоряются одновременно, по крайней мере, в обсуждаемых здесь основных эпизодах. Серьезным аргументом в пользу ускорения релятивистских электронов и ионов в рамках единого процесса является тесная корреляция непрерывного излучения в области ≥ 0.5 МэВ и ядерных линий в диапазоне 4–8 МэВ [5, рис. 4].

3. ЛОКАЛИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКА ОСНОВНОГО УСКОРЕНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЧАСТИЦ ВО ВСПЫШКЕ 14 ИЮЛЯ 2000 г.

Современные данные наблюдений позволяют в некоторых случаях локализовать источник ускорения релятивистских ($E \geq 100$ МэВ) протонов. В этом разделе проведем соответствующий анализ для вспышки, произошедшей в 2000 г. в день взятия Бастилии и известной под этим названием. Она наблюдалась в течение нескольких часов на спутнике TRACE, а жесткое рентгеновское и γ -излучения регистрировалось на спутнике Yohkoh. Рентгеновские наблюдения в диапазоне более ≈ 25 кэВ проводились в начале вспышки с 10:05 до 10:14 UT на спектрометре жесткого рентгеновского диапазона (HXRS) на борту спутника на спутнике MTI (Multispectral Thermal Imager), а после 10:19 UT — на Yohkoh. Хотя момент максимума производной потока мягкого рентгеновского излучения (1–8 Å) 10:18 UT, во многих случаях совпадающий с импульсной фазой вспышки и ускорением частиц, был в данном случае пропущен, все косвенные свидетельства, обсуждение которых проведено в [13], показывают, что до начала наблюдений на Yohkoh эффективного ускорения частиц не происходило. На спутнике Yohkoh два максимума были зарегистрированы в жестком рентгеновском диапазоне 100–300 кэВ, в задержанных и быстрых γ -линиях. Линии аннигиляции электрона и позитрона, захвата нейтрона протоном и быстрые неразрешимые линии возбуждения ядер кислорода и азота достигли максимальной интенсивности 14 июля 2000 г. в 10:21:05 UT. Второй более мощный максимум этих излучений был достигнут в $\approx 10:27$ UT [14, рис. 1].

Наблюдения однозначно фиксируют время мощного ускорения частиц во вспышке 14.07.00. В рассматриваемом втором акте ускорения тормозное излучение электронов, свечение в жесткой области, связанное с распадом π^0 -мезона, начало излучения в линиях 0.511 кэВ и 2.22 МэВ произошли синхронно. В этом случае одновременность ускорения релятивистских электронов и протонов следует непосредственно из наблюдений.

Итак, для вспышки 14.07.00 наиболее эффективное ускорение релятивистских частиц происходило в промежуток времени, совпадающий с

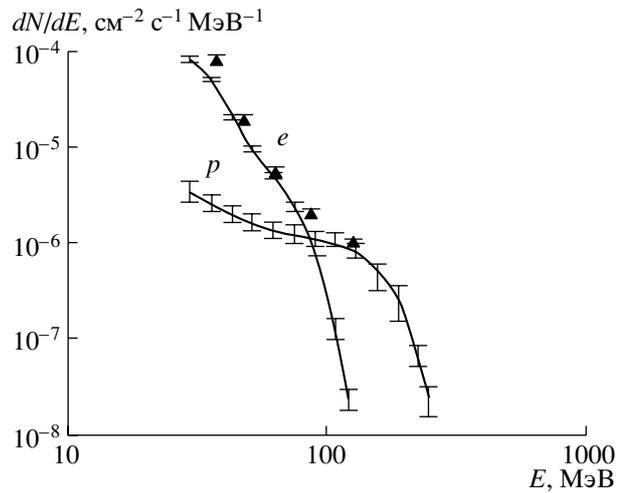


Рис. 2. Дифференциальный спектр фотонов, выходящих из вспышки 26 марта 1991 г. (близ центра диска) под углом не более 25° от радиального направления. Сплошные кривые — расчет вклада электронов и протонов [11, 12]. Треугольниками представлены наблюдаемые значения.

жестким γ -всплеском, т.е. с 10:19 по 10:30 UT, причем этот процесс, вероятно, распался на две стадии. Эту гелиофизическую информацию можно сопоставить с другими наблюдениями вспышки и временем прихода ускоренных частиц к Земле.

Белов и др. [15] на основе анализа наземного возрастания СКЛ пришли к выводу, что все или большая часть высокоэнергичных частиц, пришедших к Земле, были ускорены между 10:19 и 10:29 UT, скорее всего до 10:27 UT. Бибер и др. [16] по данным наземных наблюдений рассчитали характеристики солнечного источника ускоренных частиц, используя две различные модели распространения заряженных частиц в межпланетном пространстве. Они получили хорошее согласие модельных расчетов с наблюдаемыми у Земли потоками в предположении, что основная эмиссия заряженных частиц была относительно кратковременна (< 5 мин) и имела максимум в 10:26–10:27 UT.

Таким образом, можно считать известным время эффективного ускорения частиц на Солнце и проанализировать вопрос о процессах, происходящих на нем в эти моменты.

Вспышка 14.07.00 началась около 10:03 UT в западной части активной области, причем обычная импульсная фаза 10:04–10:06 UT была слабой и нельзя было сказать, что она перерастет в мощное событие. Далее в центральной части группы начала развиваться обычная вспышка, с несколько усложненными лентами. Это иллюстрируется на снимке спутника TRACE в диапазоне 195 Å в 10:14:24 (рис. 3а). Ситуация резко изменилась близ

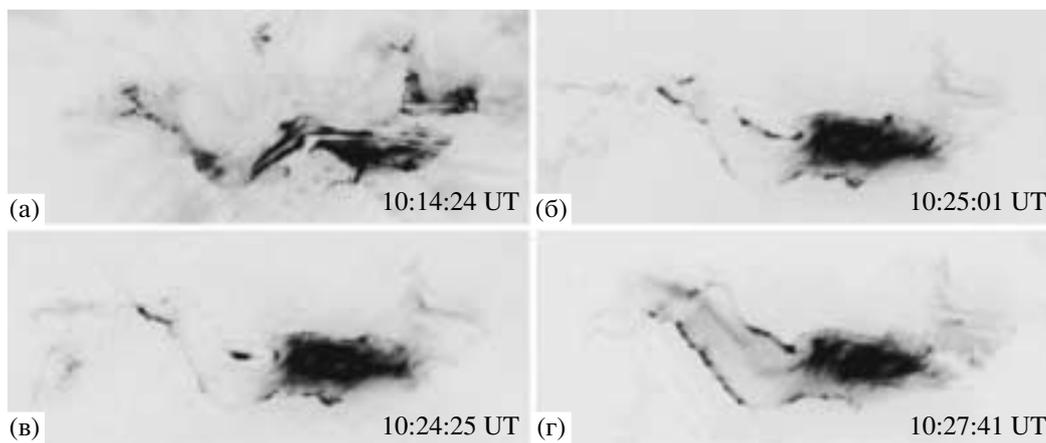


Рис. 3. Снимки вспышки 14 июля 2000 г., полученные на спутнике TRACE в диапазоне 195 Å.

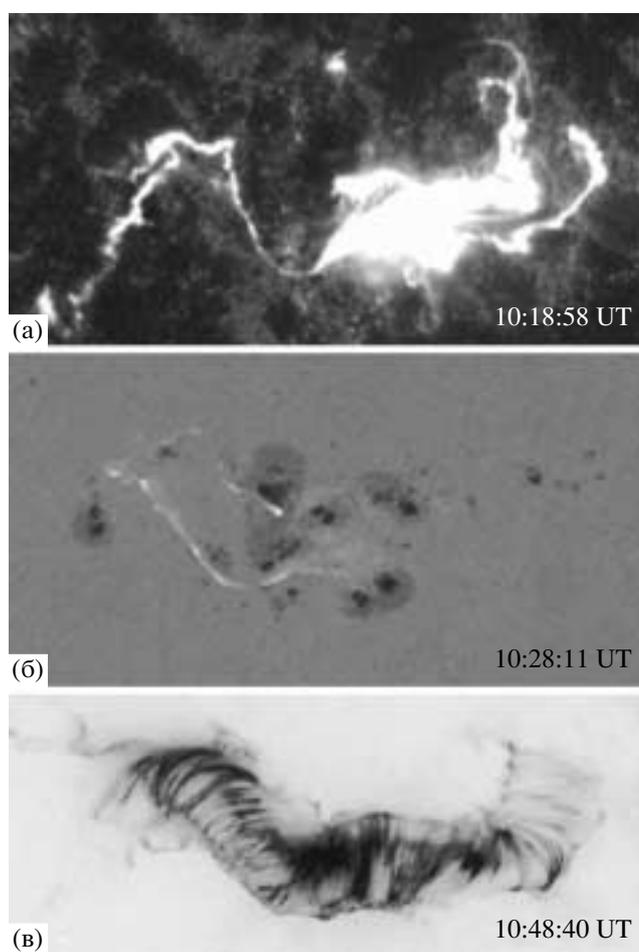


Рис. 4. Снимки вспышки 14 июля 2000 г., полученные на спутнике TRACE: (а) — в диапазоне 1600 Å (короткая экспозиция 30.4 с), где выделяется рукав, приблизившийся с запада к большому пятну; (б) — в белом свете; (с) — в диапазоне 195 Å. Масштабы снимков и поля зрения здесь точно не согласованы.

момента 10:19 UT, когда один из узлов вспышки, возникший около 10:12 UT и непосредственно при-
мыкающий к большому пятну, начал развиваться

и светящаяся плазма пересекла пятно с запада на восток. Этот процесс наиболее отчетливо на-
блюдался на спутнике TRACE в континууме близ

1600 Å (рис. 4а) и в линиях близ 171 Å, т.е. в излучении более низкотемпературной плазмы по сравнению с эмиссией в диапазоне 195 Å.

На последующих снимках в области 195 Å (рис. 3б, 3в), кроме первой яркой точки, соответствующей первому максимуму в 10:19 UT, видна и вторая область к востоку от основного пятна. После 10:25 UT свечение в области 195 Å начало распространяться в северо-восточную часть группы.

Можно отметить, что если в 10:24–10:26 UT уярчение в диапазоне 171 Å распространялось по ломаной линии, по-видимому, по границам ячеек хромосферной сетки в активной области, то затем эта линия выпрямилась и по другую сторону от нейтральной линии появилось свечение в других основаниях петель вновь образовавшейся вспышечной аркады. Затем эта аркада захватила и область прежнего двухленточного события, нагрев в ее вершине продолжался несколько часов и сопровождался постепенным подъемом петель. Заметим, что именно в момент 10:19 UT началось развитие первого, а затем и второго, более мощного радиовсплеска II рода [17], которые, вероятно связаны с несколькими выбросами плазмы.

Итак, после достижения вспышечным процессом большого пятна в 10:19 UT во вспышке 14.07.00 свечение после 10:24 UT распространяется к северо-востоку и к моменту 10:27 UT (рис. 3г) жесткое рентгеновское и γ -излучение достигают максимума. Хотя развитие вспышки после 10:27 UT продолжается далее, темп ускорения скорее всего резко падает, и нетепловые процессы постепенно затухают. Это проявляется в быстром затухании гамма-всплеска. Около этого момента (10:27 UT) начинается постэруптивный нагрев плазмы близ вершины шлемовидной структуры, которая только в 10:38 UT распадается на отдельные высокие петли. Тем самым формирование аркады заканчивается, и она захватывает восточные и западные вспышечные узлы (рис. 4в, 10:48 UT).

Остановимся здесь на особенностях рассматриваемой вспышки как источника фотонов и частиц высоких энергий. В большинстве вспышек нетепловые процессы присущи импульсной или взрывной фазам, близким к началу всего явления. Этот момент характеризуется как время максимального роста потока мягкого рентгеновского излучения (в диапазоне 1–8 Å). В некоторых вспышках, особенно мощных, высокоэнергичные явления могут появляться не в начале вспышки, а с задержкой в десятки минут. Как правило, они возникают тогда, когда вспышечный процесс приближается к большим пятнам. Представление о существенности этого фактора развивалось, в частности, Ишковым [18]

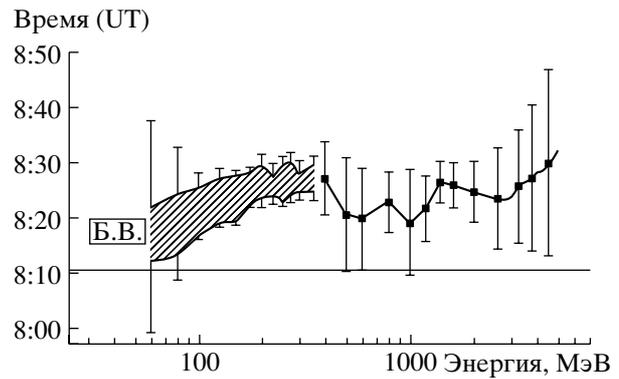


Рис. 5. Промежуток времени, в течение которого частицы различных энергий покидали солнечную корону во вспышке 15 июня 1991 г. [21]. Для энергий выше 350 МэВ определялся только один момент выхода частиц. Указана средеквадратическая ошибка определения моментов. Прямоугольником отмечено время существования белой вспышки (Б.В.) по наземным наблюдениям.

(в этой статье приведены ссылки и на его более ранние работы). Вспышка 14.07.00 представляет собой один из примеров, когда “пятенная компонента” всего нестационарного процесса отчетливо проявляется после 10:19 UT, через 15 мин после начала вспышки и через 10 мин после момента максимального темпа увеличения потока мягкого рентгена.

Событие после 10:19 UT развивается, также как и мощные импульсы, в непосредственной близости от областей с сильными магнитными полями и их градиентами, но не полностью идентично им. Обычно вспышечные ленты как будто возникают из одного центра в полутени пятна, зажигают яркие точки вдоль нейтральной линии магнитного поля в фотосфере, и их слияние и дальнейшая эволюция приводит окончательно к системе высоких корональных петель. Эта первая обычная фаза развития нетеплового процесса сменяется более интенсивной (стадии “b” и “c” развития γ -всплеска на рис. 1 статьи [14]; см. также [19, 20]). Есть основания полагать, что необычайно эффективное ускорение частиц происходит в структуре между точками по разные стороны пятна. На рис. 5 в [22] в момент 10:28:06 UT показаны несколько этих силовых линий поля (петля?), которые соединяют две яркие точки на снимке в диапазоне 171 Å, лежащие внутри основного жесткого источника (HXR/M2, 10:27:00 UT). Следует подчеркнуть, что высота вершины этой петли согласно той же работе [22] превышает 20”, что в 2–3 раза больше, чем в “типичных” импульсных нетепловых источниках. Другая, более слабая часть жесткого источника располагалась в ленте, лежащей уже по другую сторону нейтральной линии.

Характерным видимым проявлением развития эффективного нетеплового процесса 14.07.00 UT явилось распространение свечения (“джета”) на снимке TRACE в 10:24:25 UT (рис. 3б). В последующие моменты этот джет превратился в тонкую линию, лежащую практически параллельно, но заметно сдвинутую на восток от нейтральной линии (рис. 3в). В дальнейшем эта линия дала начало основаниям петель в областях северной полярности продольного поля, а другая лента возникла по другую сторону от нейтральной линии.

Характер белой вспышки 14.07.00 заметно отличается от большинства аналогичных явлений (рис. 4б). Обычно непрерывное свечение в оптическом диапазоне представляет собой две или несколько ярких точек, располагающихся в полутени или в непосредственной близости от пятен. В данном же случае после 10:19 UT доминировала другая компонента — излучение в лентах, — обычно очень слабо выраженная даже в самых мощных импульсных событиях. Здесь необходимо сделать одну оговорку: белое свечение зарегистрировано в данном событии только на спутнике TRACE. Имеются основания полагать, что спектральная полоса более чувствительна к синей области спектра (вспышки, регистрируемые на Земле в зеленых и красных лучах, оказываются не идентичными наблюдаемым на TRACE) и поэтому включает в себя многочисленные линии, образующиеся в самых нижних слоях хромосферы. Тем не менее, отсутствие выраженных ярких точек на соответствующих снимках TRACE скорее всего свидетельствует об особенностях распространения частиц в петле — источнике ускорения, а именно о том, что основная часть частиц, особенно релятивистских, не погибла в ее основаниях, а заполнила всю крупномасштабную корональную структуру. Воздействие ускоренных электронов и больших потоков тепла на плотные слои хромосферы близ оснований корональных петель в данном случае привели к появлению белого свечения лент.

Таким образом, обширные данные наблюдений вспышки 14.07.00 позволяют, по-видимому, локализовать источник ускорения релятивистских частиц. Имеется прямое указание на то, что его высота превышает высоту петель типичных источников ускоренных электронов в обычных импульсных событиях. Возможная схема развития этого нетеплового процесса будет кратко обсуждена ниже.

4. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСКОРЕНИЯ ЧАСТИЦ В МОЩНЫХ ВСПЫШКАХ

В последнее время появилась возможность проведения статистического изучения протонных событий. Действительно, база данных ИЗМИРАН

содержит 1143 протонных возрастных примерно за 28 лет наблюдений частиц в околоземном пространстве. Уже то, что за этот же период произошло 1152 вспышки мощнее M4, дает основания предполагать, что ускорение протонов связано с событиями такой мощности. Более половины из этих протонных возрастных (618) надежно отождествлены с солнечными вспышками. Оставшиеся события относятся к залимбовым явлениям (не менее 20%), а также к случаям с наложением отдельных вспышек в периоды очень высокой активности и к пропускам в рентгеновских наблюдениях 1975–1985 гг.

Остановимся здесь только на некоторых результатах, подробное изложение которых содержится в [23]. Ясно, что чем мощнее вспышка, тем с большей вероятностью она окажется протонной. Мы сравнили характеристики всех 409 надежно локализованных протонных вспышек в диапазоне долгот между 20°E и 90°W и контрольной группы в той же полосе долгот и с той же средней мощностью (M6 и ярче), но без усиления потока протонов. Оказалось, что длительность dt для протонных явлений составляет 80 ± 4 мин, а для контрольной группы — 57 ± 4 мин.

Итак, наиболее выраженной является связь общего числа протонов, ускоренных до $E \geq 10$ МэВ, с общей энергетикой или рентгеновским баллом вспышки. Влияние собственно длительности всего явления, если и существует, то выражено слабо и не может использоваться в качестве серьезного аргумента в пользу постэруптивного ускорения частиц в вертикальном токовом слое или на ударной волне.

Рассмотрение 110 протонных вспышек мощнее X1 позволяет выявить следующую тенденцию [24]: большие потоки протонов с энергиями, близкими к 10 МэВ, “чувствуют” развитие гигантских арок после CME, в то время как относительное количество релятивистских частиц (или спектр в диапазоне 10–100 МэВ в области ускорения) более тесно связано с общим развитием нетепловых процессов в импульсной фазе или в моменты, непосредственно примыкающей к ней. При этом постэруптивная фаза выделяется на основании как прямых наблюдений гигантских систем петель, так и из анализа хода температуры, определяемого по отношению сигналов двух каналов спутников GOES [25], а импульсные события характеризуются, прежде всего, “флюенсом” нетеплового излучения с $E \geq 30$ кэВ.

Эти общие для X вспышек выводы в полной мере относятся к собранным в таблице данным о случаях наиболее эффективного ускорения релятивистских протонов. Все вспышки таблицы в западной и центральной части диска вошли, конечно, в исследуемые выше протонные X-вспышки и являются просто событиями с наибольшими потоками

релятивистских протонов. В нескольких случаях включенному в таблицу событию предшествовала вспышка, близкая по эффективности генерации релятивистских частиц, но их потоки во втором событии усиливались из-за взаимодействия СМЕ в межпланетном пространстве (между двумя ударными волнами в процессе “каннибализма” СМЕ), как это было 4 августа 1972 г.

Возвращаясь к роли длительности вспышек в ускорении, укажем, что в таблице представлены только несколько коротких компактных вспышек 22 марта 1991 г., 24 мая 1990 г., 6 ноября 1997 г, в то время как общая длительность мягкого рентгеновского излучения остальных явлений превышает 1 час. Однако в подавляющем большинстве случаев импульсная фаза отчетливо выражена, хотя в рассматриваемых мощных событиях не всегда может происходить в начале явления. Итак, по нашему мнению, роль собственно длительности явления в генерации релятивистских частиц до сих пор переоценена, и самое эффективное ускорение связано с мощными импульсными эпизодами больших вспышек.

В настоящее время на массиве более 55000 рентгеновских вспышек показано, что чаще всего даже мощные импульсные события на Солнце не сопровождаются появлением сколь-нибудь значительных потоков ускоренных протонов. Это связано с тем, что источник ускорения располагается в примыкающих к хромосфере петлях закрытой магнитной конфигурации. Жесткое рентгеновское и γ -излучение в этом случае максимально, но выход ускоренных частиц сильно затруднен. В тех редких случаях, когда мощная короткая вспышка приводит к появлению даже небольшого участка, где силовые линии магнитного поля выходят наружу, на сферу источника солнечного ветра, ускоренные частицы устремляются в межпланетное пространство. Одним из примеров является событие 24 мая 1990 г. с максимальным из зарегистрированных на Земле потоком солнечных нейтронов.

Авторами этой статьи ранее [26] проанализированы данные о регистрации нейтронов прибором ФЭБУС спутника ГРАНАТ [9]. Простая кинематическая модель позволила определить длительность генерации $\delta t = 230 \pm 15$ с, показатель степенного спектра $\gamma = -1.94 \pm 0.08$ и полное количество частиц, вышедших в межпланетное пространство, — около 2×10^{28} нейтронов с энергией $E > 100$ МэВ. Используя результаты теоретического рассмотрения [27], можно получить, что для генерации указанного числа нейтронов необходимо $N_p(E > 30 \text{ МэВ}) = 2 \times 10^{33}$ протонов, что является характерной величиной для других СКЛ. Приведенный недавно профиль γ -всплеска [28] позволяет уточнить принятую аппроксимацию наблюдаемого потока солнечных нейтронов во время регистрации

большого потока жестких фотонов, что приводит к оценке длительности генерации релятивистских нейтронов < 100 с. Таким образом, этот пример иллюстрирует то, что необходимые потоки релятивистских частиц возникают на Солнце за время в одну или несколько минут и собственно длительность всей вспышки здесь не является определяющим фактором.

Обратимся теперь к мощным и длительным вспышкам, представленных в таблице. В какой-то мере “типичной” для них является событие 15 июня 1991 г. Вспышка 15.06.91 балла X12.5 с началом 8:10 UT и координатами 36°N и 70°W характеризовалась мощным импульсом и последующим развитием системы гигантских петель, просуществовавших до конца дня. Мощное непрерывное оптическое свечение наблюдалось в 8:15–8:23 UT в компактных арках размером около $10''$ [29]. Развитие ярких точек около пятен типично для белых вспышек. Однако в этой белой вспышке зарегистрирована линия поглощения нейтрального углерода, свидетельствующая о том, что пучок электронов проник в достаточно глубокие слои фотосферы.

Возрастание потоков высокоэнергичных протонов было в данном случае почти изотропным, что, по-видимому, связано с исключительно сильной возмущенностью межпланетного пространства в это время. В таких условиях удалось успешно применить диффузионную модель распространения частиц [30] и модифицированную для длительной инжекции. Эта модель достаточно хорошо описывает наблюдаемые временные профили рассматриваемого события, в том числе и самое начало возрастания, что удается исключительно редко при анализе солнечных космических лучей. По наблюдаемым профилям и их диффузионной аппроксимации можно получить интегральные потоки и флюенсы частиц различных энергий и оценить полное число ускоренных протонов на околоземной орбите. Для энергий, превышающих 30 МэВ, интегральный флюенс составляет $(4 \pm 2) \times 10^8 \text{ см}^{-2}$, а полное число частиц $N_{tot}(\geq 30 \text{ МэВ}) = (1.7 \pm 0.9) \times 10^{33}$.

Время инжекции определяется с достаточной точностью для энергий 80–350 МэВ. Результаты, относящиеся к выходу потока протонов, представлены на рис. 5. Сравнение моделей с мгновенной и непрерывной инжекцией проведено в [21]. Из него следует, что протоны с энергиями 175–350 МэВ начинают покидать Солнце в $8:23 \pm 0:01$ UT, и их эмиссия продолжается 6 ± 1 мин. Этот момент совпадает с окончанием импульсного микроволнового всплеска — концом импульсной фазы, — когда $\text{H}\alpha$ -ленты резко расходятся; ранее этот период

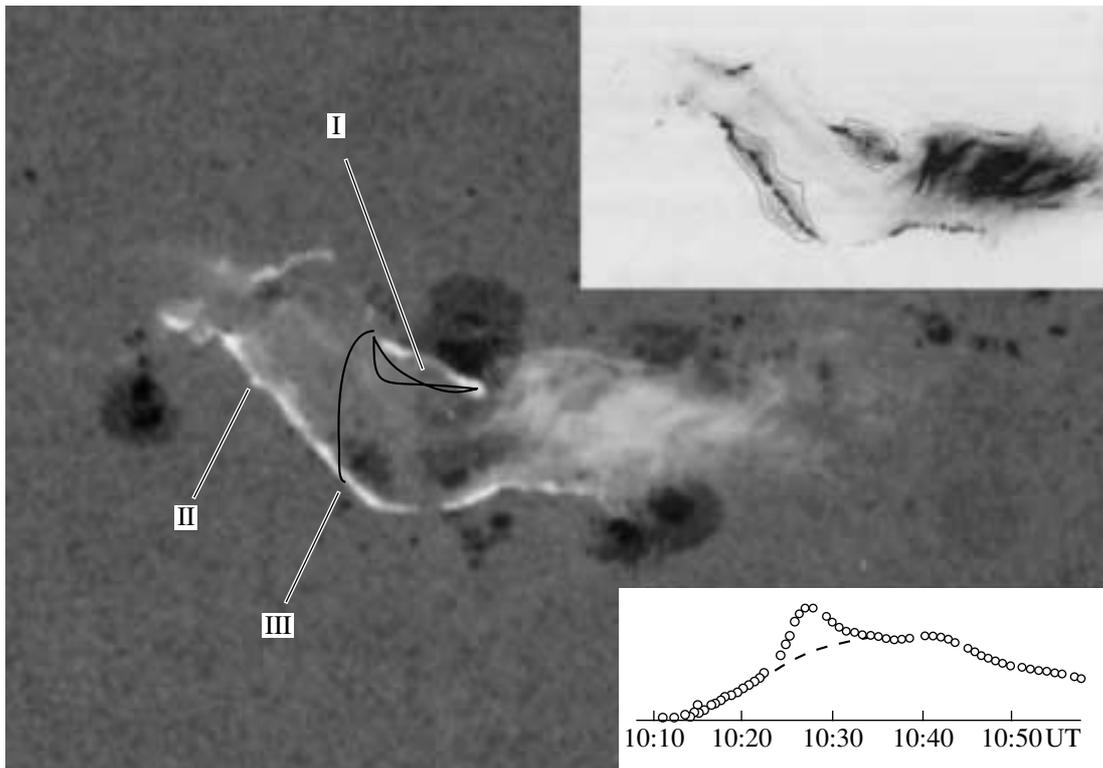


Рис. 6. Схематическое сопоставление эффектов в момент близ максимума γ -всплеска 14 июля 2000 г. На снимок пятен наложены узлы вспышки (диапазон 195 \AA , яркость западной части уменьшена). Положение источников жесткого рентгеновского излучения указано римскими цифрами I, II, III; изолинии их яркости приведены в правом верхнем углу (согласно рис. 8 в [19]). Схематически показано положение петель, согласующееся с расчетами [22] хода силовых линий магнитного поля в области жесткого излучения. Изменение яркости в диапазоне 171 \AA всей области вспышки приведено в правом нижнем углу по [20]; штриховой линией здесь приведена яркость той же области без площади, занятой жестким источником I.

назывался взрывной (flash) фазой. Ускорение протонов более высоких энергий $1.3\text{--}4 \text{ ГэВ}$ происходит практически в тот же момент $8:25 \pm 0:03 \text{ UT}$ и продолжается еще более короткое время.

Таким образом, ускорение релятивистских протонов в широкой области энергий начинается сразу после импульсной фазы вспышки 15.06.91 и длится несколько минут.

Итак, во всех событиях таблицы есть основания допускать дополнительное ускорение релятивистских частиц, близкое по своей продолжительности и локализации к импульсному. Для некоторых из вспышек таблицы проведены подробные измерения в гамма-диапазоне, которые свидетельствуют о длительности основного ускорения релятивистских частиц не более нескольких минут. Это подтверждается для некоторых событий анализом данных о протонах и нейтронах, регистрируемых на Земле и в межпланетном пространстве.

Напомним, что здесь обсуждается ускорение основной части релятивистских частиц. Наблюдения на телескопе ГАММА-1 фотонов с энергиями от 30 МэВ до нескольких ГэВ , начавшиеся 15.06.91

после $8:37 \text{ UT}$, продемонстрировали существование на Солнце частиц высокой энергии в момент включения пост-эруптивного энерговыделения. Высокий уровень γ -излучения в течение примерно 10 мин после импульса был вообще характерен для всех мощных вспышек июня 1991 г. Акимов и др. [31], анализирующие данные ГАММА-1 для вспышки 15.06.91, полагают, что во время второго максимума микроволнового всплеска ($\approx 8:30 \text{ UT}$) происходило дополнительное ускорение частиц, а не их удержание в магнитной ловушке.

Разумеется, не во всех случаях, представленных в таблице, импульс является таким мощным, как 15 июня 1991 г. Более того, в мощных вспышках импульсное энерговыделение и жесткий всплеск происходят, как и во вспышке 14 июля 2000 г. и похожем явлении 4 ноября 2001 г., через десятки минут после начала. Характер белой вспышки также несколько различается: вместо обычных ярких точек в полутени пятна (или пятен) в явлениях 14 июля 2000 г. и 4 ноября 2001 г. наблюдается свечение лент в континууме около 1600 \AA . Это свечение нижней хромосферы может вызываться

заполнением высоких корональных петель релятивистскими частицами и их гибелью в основаниях арочной системы.

Заканчивая этот раздел о мощных вспышках, заметим, что для большинства случаев нет необходимости предполагать, что наиболее эффективное ускорение релятивистских частиц происходит не в одном процессе. Такие события, как 4 августа 1991 г., когда существовали два последовательных высокоэнергичных события, что следует из наблюдений двух максимумов интенсивности линии 2.22 МэВ [32] и континуума, связанного с распадом нейтрального π^0 -мезона, скорее исключение, чем правило.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выше было проведено морфологическое исследование предполагаемого источника ускорения релятивистских частиц. Оно стало возможным только благодаря проведению наблюдений жесткого электромагнитного излучения нестационарных процессов на Солнце с очень высоким временным и пространственным разрешением и регистрации ускоренных частиц в межпланетном пространстве и на Земле. В статье приводятся аргументы в пользу того, что примерно в 30 мощных явлениях последних трех солнечных циклов включается новый дополнительный источник, ускоряющий частицы до релятивистских энергий существенно более эффективно по сравнению с тем, как это происходит в чисто импульсных вспышках и в постэруптивной фазе мощных явлений.

Современные наблюдения позволяют локализовать источник этого эффективного ускорения, используя то, что релятивистские электроны и протоны ускоряются одновременно. В качестве примера в третьем разделе статьи подробно обсуждается вспышка в день взятия Бастилии (2000 г.). Результат оказался очень простым: это место совпадает с источником излучения $h\nu = 33\text{--}53 \text{ кэВ}$ в момент максимума γ -всплеска. В этом же месте, с точностью до $3''$, излучается избыток фотонов в коротковолновых линиях ионов с ионизационными температурами $1.2\text{--}1.5 \text{ МК}$. Это иллюстрируется на рис. 6, где положение самого яркого источника I в полосе M2 жесткого рентгеновского телескопа НХТ примыкает с востока к самому большому пятну группы. На схеме указаны также рассчитанные в [20] положения петель, — как расположенной внутри источника I, так и более высокой, — которые соединяют его с другой лентой вспышки (II и III). Ход относительной яркости источника I в диапазоне 171 \AA показывает, что во время “ускорения” возникает дополнительное свечение [20] (см. также [19] для диапазона 195 \AA). Это означает,

по-видимому, что по сравнению с небольшими импульсными вспышками источник интенсивного жесткого свечения располагается на большей высоте, уже над хромосферным $\text{H}\alpha$ -холмом над этой зоной пятен. Высота здесь, как по рассчитанным магнитным петлям, так и по наблюдениям больших активных областей на лимбе в диапазонах 171 и 195 \AA оценивается как 15 ± 5 тыс. км. Это соответствует среднему масштабу с характерным размером между хромосферными и корональными петлями. Таким образом, ускорение в более протяженном источнике, остающемся в области больших магнитных полей и их градиентов, действительно может быть значительно более эффективным.

Кроме того, выход ускоренных частиц из более высокого источника и заполнение ими корональных петель облегчаются. Возможно это способствовало развитию мощной постэруптивной фазы вспышки 14 июля 2000 г. Все развитие событий после 10:24 UT указывает, по-видимому, на необходимость учета в моделях вспышек распространения и дрейфа ускоренных частиц в магнитном поле. В данном случае первые уярчения в диапазоне 195 \AA появляются в противоположных концах северной ленты, удаленных на расстояние более 200 тыс. км, через время не более 1 с. Это свидетельствует о скоростях, сравнимых со скоростью света. Нагрев близ вершины аркады проявляется через несколько секунд, но ее распад на поствспышечные рентгеновские петли происходит примерно через 10 мин после крупномасштабного выброса и ускорения частиц. Можно отметить, что для некоторых вспышек складывается впечатление, что крупномасштабное возмущение направлено перпендикулярно как полю (силовой линии), так и его градиенту с высотой, т.е. по вектору скорости дрейфа в неоднородном магнитном поле.

Проведенное рассмотрение показывает, что во всех событиях, собранных в таблице (кроме 8 ноября 2000 г.), а также в мощных вспышках 23 февраля 1956 г., 4, 9, 11 и 15 августа 1972 г. существовал дополнительный источник ускорения частиц высоких энергий. Одно свойство этих событий представляется доказанным: этот процесс происходил в наибольших по площади группах пятен, для вспышек последних лет — в непосредственной близости от полутени. Для большинства самых выдающихся протонных возрастных, в которых наблюдались протоны с энергией 1 ГэВ и большие потоки протонов с энергией $> 100 \text{ МэВ}$, можно, по-видимому, ограничиться учетом одного доминирующего ускорительного процесса, а особенности наблюдаемых временных профилей частиц связывать с условиями последующей эволюции пучков в короне и межпланетном пространстве.

Совокупность накопленных данных о протонных событиях позволяет наметить общие черты

ускорительного процесса, создающего большие потоки релятивистских протонов. Такое эффективное ускорение должно происходить в достаточно сильном магнитном поле, способном удерживать заряженные частицы во время ускорения. С другой стороны, поле не должно быть слишком сильным, чтобы ускоренные частицы могли покинуть место генерации. Высота места ускорения не может быть малой, поскольку высокая плотность вещества на малых высотах губительна для ускоренных частиц. Однако и большие высоты не годятся, поскольку с увеличением высоты солнечное магнитное поле становится слишком простым и слабым.

Солнечный релятивистский ускоритель включается редко и ненадолго. Это происходит во время импульсной фазы наиболее мощных вспышек. Продолжительность ускорения (или его наиболее эффективной фазы) не превышает нескольких минут — только 10^{-6} часть времени Солнце работает как релятивистский ускоритель. Такая редкость и кратковременность эффективного ускорения — свидетельство его связи с какими-то быстропротекающими изменениями солнечных магнитных полей катастрофического характера. Момент действия солнечного ускорителя совпадает с началом мощного выброса плазмы — эрупцией. Эруптивная перестройка солнечного магнитного поля одновременно приводит к ускорению и облегчает выход ускоренных частиц из области генерации.

Разумеется, не любая эрупция приводит к эффективной генерации солнечных космических лучей. В тех же случаях, когда это происходит, ускорение до релятивистских энергий имеет место не во всей обширной зоне эрупции, а только в малой ее части — там где изначально были сильные магнитные поля с большими градиентами. Эти условия имеются около пятен, т. е. именно там, где мы наблюдаем обсуждаемый эпизод вспышки.

Таким образом, генерация высокоэнергичных частиц на Солнце связана и с СМЕ, и со вспышками. У нас нет оснований думать, что СМЕ создают релятивистские частицы, но мы можем утверждать, что СМЕ и высокоэнергичные СКЛ создаются в одном и том же взаимосвязанном комплексе солнечных спорадических явлений. Связь со вспышками еще более тесная, чем связь с СМЕ. Ускорение заряженных частиц является составной частью вспышки, а ускоренные частицы с их релятивистскими скоростями способствуют более быстрой пространственной экспансии вспышечного процесса. Мы полагаем, что сделанные общие выводы справедливы не только для самых больших, но и обычных протонных событий, в которых поток протонов с энергией >100 МэВ мал или отсутствует. Разумеется, в конкретных событиях относительный вклад импульсного, обсуждаемого

здесь дополнительного (эруптивного) и постэруптивного ускорений может различаться.

Необходимо также особо подчеркнуть, что обнаруженное для вспышки 14 июля 2000 г. совпадение областей ускорения релятивистских частиц и источника жестких фотонов является вероятно частой, но не единственной возможностью. Альтернативной является ситуация, когда другое основание корональной петли выглядит в жестком рентгеновском и γ -излучениях более ярким и протяженным (на рис. 6 это соответствует большему потоку от источников II и III по сравнению с потоком от источника I). Впервые такая ситуация была отмечена при наблюдении на спутнике АСТРОН звездной вспышки, для которой отклик на воздействие ускоренных частиц на хромосферу оказался более мощным не в начале, а через 40 с — вероятно, в другом основании петли. Иначе говоря, условия распространения ускоренных частиц вниз, в сторону плотных слоев, непосредственно под источником ускорения могут быть хуже, и жесткие тормозные фотоны могут возникать здесь на меньшей площади, чем в другом основании петли. Если интенсивное свечение появляется в основании, противоположном области ускорения, распространение ускоренных частиц различных энергий может приводить к некоторому различию положений источников фотонов различных энергий.

Обсуждение теоретических проблем, касающихся вспышек и ускорения частиц в них, выходит за рамки этой статьи. Следует однако подчеркнуть, что для теории представляется важным то, происходит ли дополнительное ускорение вдоль петель среднего масштаба или в сильном токе, текущем здесь же вдоль сепаратрисы. К сожалению, расчеты [22] только указывают на возможное существование петель в жестком источнике I, но этот факт не подтверждается никакими наблюдениями и не может сегодня считаться достоверным. Этот вопрос заслуживает дальнейшего рассмотрения.

Авторы благодарны исследователям, обеспечившим наблюдения на спутниках TRACE, SOHO и Yohkoh (изображения Солнца) и на спутниках GOES и IMP-8 (данные о солнечных протонных возрастаниях) и предоставивших открытый доступ к результатам этих измерений. Мы благодарны С.Б. Ринчинову за разрешение использовать рисунок из его диссертации, И.М. Чертоку, В.В. Гречневу, В.Г. Курт за обсуждение работы. Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (коды проектов 02-02-17086, 03-07-90389 и 04-02-16763).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. I. Sladkova, G. A. Bazilevskaya, V. A. Ishkov, *et al.*, Catalogue of Solar Proton Events 1987–1996 (Moscow University Press, 1998), pp. 246.

2. A. V. Belov and E. A. Eroshenko, Radiation measurement **26**(3), 461 (1996).
3. А. В. Струминский, Астрон. журн. **80**, 992 (2003).
4. G. Rank, J. Ryan, H. Debrunner, *et al.*, Astron. and Astrophys. **378**, 1046 (2001).
5. E. Rieger, *Solar and Stellar Flares*, Ed. by R. Haisch and M. Rodono (Dordrecht: Kluwer, 1989), p. 323.
6. Э.В. Вашенюк, *Релятивистские протоны в солнечных космических лучах*. Докт. дисс. (Апатиты, 2000).
7. М.-В. Kallenrode, in Proc. of "Solar Encounter: The First Solar Orbiter Workshop". ESA SP-493. 23 (2001).
8. В. В. Akimov, N. G. Leikov, A. V. Belov, *et al.*, in *High Energy Solar Phenomena: New Era of Spacecraft Measurements*. AIP **294**, 130 (1994).
9. О. В. Терехов, Р. А. Сюняев, А. В. Кузнецов и др., Письма в "Астрон. журн.". **19**, 163 (1993).
10. K. Watanabe, Y. Muraki, Y. Matsubara, *et al.*, *Solar Neutron Event in Association with a Large Solar Flare on November 24, 2000*; astro-ph/0304067 (2003).
11. А. М. Гальпер, Б. И. Лучков, Ю. В. Озеров, и др., Астрон. журн. **77**, 447 (1999).
12. С.Б. Ринчинов, *Высокоэнергичное (> 30 МэВ) гамма-излучение солнечных вспышек*. Канд. дисс. (Москва, 2003).
13. K.-L. Klein, G. Trottet, P. Lantos, and J.-P. Delaboudiniere, Astron. and Astrophys. **373**, 1073 (2001).
14. G. H. Share, R. J. Murphy, A. J. Tylka, *et al.*, Solar Phys. **204**, 43 (2001).
15. A. V. Belov, J. W. Bieber, E. A. Eroshenko, *et al.*, Proc. 27th Int. Cosmic Ray Conf. Hamburg: Copernicus Gesellschaft **8**, 3446 (2001).
16. J. W. Bieber, W. Drg̃e, P. A. Evenson, and R. Pyle, Astrophys. J. **567**, 622 (2002).
17. I. M. Chertok, V. V. Fomichev, A. A. Gnezdilov, *et al.*, Solar Phys. **204**, 141 (2001).
18. В.И. Ишков, В кн.: *Современные проблемы астрофизики*. Тр. Гос. астрон. ин-та им. П.К. Штернберга, **67**, часть 2, 264 (2001).
19. L. Fletcher and H. Hudson, Solar Phys. **204**, 71 (2001).
20. M. J. Ashwanden and D. Alexander, Solar Phys. **204**, 93 (2001).
21. A. V. Belov, E. A. Eroshenko, M. A. Livshits, in: Proc. Eighth Int. Symp. on Solar Terrestrial Physics. Sendai, Japan, p.26, 1994.
22. Y. Yan, M. J. Ashwanden, S. Wang, and Y. Deng, Solar Phys. **204**, 29 (2001).
23. A. V. Belov, H. Garsia, Kurt Viktoria, *et al.*, Astrophys. J. (in press) 2005.
24. А. Р. Осокин, А. В. Белов, М. А. Лившиц, Астрон. вестн. (в печати) 2005.
25. М. А. Лившиц, О. Г. Бадалян, А. В. Белов, Астрон. журн. **79**, 659 (2000).
26. А. В. Белов, М. А. Лившиц, Письма в "Астрон. журн.". **21**, 42 (1995).
27. R. Ramaty, in: *Physics of the Sun* Eds P. A. Sturrock *et al.*, **2**, Reidel. p. 291 (1986)
28. N. Vilmer, A. N. Mac Kinnon, G. Trottet, and C. Barat, Astron. and Astrophys. (in press) 2004.
29. А. Н. Бабин, А.Н. Коваль, Письма в "Астрон. журн.". 1992, **18**, 727
30. S. M. Krimigis, J. Geophys. Res. **70**, 2943 (1965).
31. В. В. Akimov, P. Ambroz, A. V. Belov, *et al.*, Solar Phys. **166**, 107 (1996).
32. A. Struminsky, M. Matsuoka, K. Takahashi, Astrophys. J. **429**, 400 (1994).

When and Where are Solar Cosmic Rays Accelerated Most Efficiently?

M. A. Livshits and A. V. Belov

The acceleration of particles by solar flares with extremely large proton fluxes whose energy exceeds 100 MeV is considered. Most importantly, the position of the source of such acceleration in the flare of July 14, 2000 is determined assuming that the acceleration time coincides with an outburst of hard line and continuous gamma-ray emission. The onset of this event corresponds to 10:19 UT, when data taken by the TRACE space observatory show that one of the flare ribbons reached a large sunspot in a group. The time interval for the development of the flare, 10:20–10:28 UT, is associated with the onset of an increasing proton flux at the Earth. The region of efficient acceleration is estimated to be approximately two to three times higher than the height where the hard X-ray pulse usually originates (about 7000 km). The results are generalized for 28 powerful flares with extremely efficient acceleration of relativistic particles—in particular, for the well studied events of June 15, 1991 and May 24, 1990—and are compared with the results of a statistical analysis of over 1100 increasing-proton-flux events. Efficient particle acceleration seems to be associated with the powerful pulse episodes of the large flares analyzed. The results suggest that, along with sources of local (as in the pulsed flares) and post-eruptive acceleration, there is an additional, very efficient, moderate-scale "accelerator" in tenuous regions with fairly strong magnetic fields and magnetic-field gradients.