

УДК 523.165

ПРИХОД ПЕРВЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОНОВ И УСЛОВИЯ В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ

© 2008 г. Г. А. Базилевская, А. К. Свиржевская

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

e-mail: bazilevs@fian.fiandns.mipt.ru

Поступила в редакцию 08.11.2007 г.

События, когда солнечные космические лучи (СКЛ) можно наблюдать наземными приборами (GLE), часто характеризуются быстрым нарастанием интенсивности релятивистских протонов в начальной фазе, что позволяет оценить время выхода частиц из короны Солнца. Эта фаза события привлекает внимание исследователей благодаря своей близости по времени к моменту ускорения частиц. Известно, что наблюдаемые характеристики СКЛ несут следы воздействия многих физических процессов, в том числе и различных механизмов ускорения, относительная роль которых до настоящего времени не ясна. Основными претендентами на роль ускорителя СКЛ выступают вспышечные процессы и ускорение ударной волной, связанной с выбросом корональной массы (ВКМ). В работе рассмотрено несколько мощных солнечных протонных событий 23-го цикла солнечной активности, оценены время выхода первых частиц из короны и динамика ВКМ. Анализируются временные последовательности рентгеновских и радиовсплесков, близких по времени к выходу частиц. Делается вывод, что первые релятивистские частицы, скорее всего, были ускорены во вспышечных процессах.

PACS: 6.60.Vg, 96.60.pc

1. ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о месте ускорения солнечных космических лучей (СКЛ) стоит давно и далек от разрешения. Хотя многие исследователи (например, [Kahler, 1994; Reames, 1999; Bieber et al., 2004]) полагают, что даже релятивистские солнечные протоны (РСП) ускоряются на ударной волне, связанной с выбросом корональной массы (ВКМ), остается немало фактов, которые трудно объяснить в рамках этой концепции, и, прежде всего, это касается эффективности ускорения. Релятивистские солнечные протоны, которые регистрируются на наземных нейтронных мониторах, иногда приходят на Землю через несколько минут после взрывного энерговыделения на Солнце. Это предъявляет строгие требования к эффективности ускорения большого числа частиц до релятивистских энергий ударной волной. В данной работе рассматривается начальная фаза нескольких наземных возрастных СКЛ на нейтронных мониторах с целью выявления условий, необходимых для ускорения протонов ударным фронтом.

2. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Для анализа были выбраны наземные возрастные СКЛ (GLE) в 23-м цикле солнечной активности с амплитудой более 10 % на полярных станциях, чтобы сигнал был ярко выражен на фоне галактических космических лучей [<http://www.wdcb.ru/stp/data/cosmic.ray/>]. В список вошло 9 событий. Данные о вспышках в оптическом и мягком рентгеновском диапазоне взяты из [<ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR-DATA/SOLAR-FLARES/XRAY-FLARES/>]. Кроме того, использованы данные RHESSI о вспышках в жестком рентгене [<http://www.mssl.ucl.ac.uk/www-solar/surfindex.html>]. Данные RHESSI имеются, начиная с 2002 г. Сведения о ВКМ взяты из [<http://ares.nrl.navy.mil/cmelist.html>]. Все рассматриваемые события сопровождались ВКМ типа гало. Данные о радиовсплесках взяты из [<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/ftpsolarradio.html#fixed-bursts>].

3. АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ СООТНОШЕНИЙ
МЕЖДУ НАЧАЛОМ ВЫХОДА РСП
И СОПУТСТВУЮЩИМИ ЯВЛЕНИЯМИ
НА СОЛНЦЕ

Пользуясь данными мировой сети станций (МЦД), мы установили наиболее раннее время прихода РСП для каждого события. Необходимость этого связана с тем, что анизотропный поток СКЛ приходит к Земле только с определенного асимптотического направления в пространстве, зависящего от географического места станции, траектории частицы в магнитосфере и энергии частицы (например, [Вашенюк и др., 2006]). Поэтому время начала возрастания может существенно различаться для разных станций.

Таблица 1. События с солнечными релятивистскими протонами, характеристики вспышек, станции, зафиксировавшие самый ранний приход частиц, скорость солнечного ветра и время пролета от Солнца до Земли протона с $E = 1.5$ ГэВ

№ события	Дата	Вспышка		Самый ранний приход, UT	Станция	Скорость солнечного ветра, км/с	Время пролета, мин
55	06.11.1997	S18 W63	2B/X9.4	12:17	Ю. Полюс	349.66	10.94
59	14.07.2000	N22 W07	3B/X5.7	10:32.5	Оулу	593.47	9.76
60	15.04.2001	S20 W87	2B/X14.4	13:57	Ю. Полюс	498.85	10.04
61	18.04.2001	S20 W120	.../C2.2	02:33	Ю. Полюс	490.15	10.07
65	28.10.2003	S16 E08	4B/X17.2	11:13.5	Москва	774.26	9.47
66	29.10.2003	S19 W09	2B/X10	20:58	Ю. Полюс	нет дан.	11.00
67	02.11.2003	S14 W56	2B/X8.3	17:21	Ломн. Шт.	525.97	9.95
69	20.01.2005	N12 W58	2B/X7.1	06:48.5	Ю. Полюс	855.40	9.39
70	13.12.2006	S06 W23	4B/X3.4	02:47.5	Оулу	641.36	9.66

Для того чтобы корректно оценить время выхода частиц из источника на Солнце, нужно знать длину силовой линии межпланетного магнитного поля (ММП), соединяющей Солнце и наблюдателя, вдоль которой распространяются заряженные частицы. Время распространения t частицы с нулевым питч-углом от Солнца до наблюдателя находится по формуле:

$$t = Lc/\beta, \quad (1)$$

где L – длина спирали Архимеда, зависящая от скорости солнечного ветра, c – скорость света, β – скорость частицы. Минимальная энергия протонов, дающих вклад в темп счета полярных нейтронных мониторов во время событий СКЛ, порядка 500 МэВ, но они не составляют существенной части регистрируемых частиц из-за малой кратности нейтронных мониторов в этой области энергий. Учитывая кратности нейтронных мониторов [Lockwood et al., 1974] и реальную форму энергетического спектра первых приходящих протонов (так называемой быстрой компоненты) [Вашенюк и др., 2007], мы установили, что их эффективная энергия в большинстве случаев составляет $E = 1.5–2$ ГэВ. В настоящей работе используется $E = 1.5$ ГэВ, что дает $\beta = 0.923$; неопределенность времени распространения в этом случае равна $+ 0.5/-0.3$ мин. Скорость солнечного ветра определялись путем интерполяции между ее часовыми значениями до и после прихода первых протонов, приведенными на веб-сайте [ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacescraft—data/omni/]. Неточность, возникающую при этом, можно грубо определить по среднеквадратичному разбросу времени прилета из-за разной скорости солнечного ветра, который составляет 0.6 мин. Рассчитывалось время транспорта частиц с нулевым питч-углом, которое является нижним пределом времени распространения. Согласно [Klein and Posner, 2005], средний

питч-угол θ при распространении первых частиц с энергией десятки МэВ составляет $\sim 30^\circ$, что приводит к увеличению времени распространения на $\sim 15\%$. Для релятивистских частиц это увеличение должно быть меньше. Таким образом, вычитая из времени прихода частиц время распространения согласно формуле (1) при $\cos\theta = 1$, мы определяем наиболее позднее время выхода частиц из Солнца. В целом, точность определения времени выхода, по нашим оценкам, составляет ± 1 мин, кроме того, реальное время выхода, возможно, сдвинуто на ~ 1.5 мин назад из-за неучета среднего питч-угла.

В табл. 1 приводятся номера отобранных событий согласно международной классификации наземных возрастаний, их даты, характеристики связанных с ними вспышек, станции, где наблюдался наиболее ранний приход частиц, и время распространения от Солнца протонов с энергией 1.5 ГэВ.

Для каждого события была построена диаграмма “время на Солнце–высота ВКМ” (траектория ВКМ). Диаграммы, примеры которых показаны на рис. 1, приведены в одинаковом масштабе, что дает представление о разнообразии временных длительностей. Вертикальным отрезком без символов указано время выхода частиц из короны. Точка пересечения отрезка с траекторией ВКМ–высота ВКМ в момент выхода частиц. Экстраполяция высоты ВКМ за пределы реальных измерений (в квадратичном приближении) дана пунктиром. Отсюда можно оценить время зарождения ВКМ, хотя предположение о постоянстве зависимости скорости от высоты для начальной фазы ВКМ некорректно. Вертикальными отрезками с разными значками обозначены времена начала и максимума мягкого рентгена (SX), максимума жесткого рентгена (HX , там, где были измерения), начала радиоизлучения II типа.

Горизонтальными отрезками показаны продолжительности мягкого и жесткого рентгена и всплесков радиоизлучения III типа. Диаграммы позволяют наглядно проследить высоту ВКМ в момент того или иного явления и последовательность явлений на Солнце для каждого события. Рентгеновское излучение свидетельствует о течении вспышечного процесса. Радиоизлучение II типа указывает на прохождение корональной ударной волны. Радиоизлучение III типа свидетельствует о наличии в активной области открытых силовых линий, связывающих ее с межпланетной средой [Cane et al. 2002]. На рис. 1 можно отметить разнообразие временных последовательностей вспышек и сопутствующих явлений.

В событии № 65 видно присутствие в короне двух ВКМ, но только второй выброс, стартовавший через ~1.3 часа после начала вспышки, был достаточно мощным. Вспышка в рентгене была длительной, момент максимума жесткого рентгена практически совпадает с моментом выхода частиц из короны. Для события № 69 показана также траектория ВКМ, предложенная в работе [Goralswamy et al., 2005]. В этом случае экстраполированное время начала ВКМ опережает начало вспышки в мягком рентгене; то же самое наблюдалось в событиях № 55 и № 61 (не показаны на рисунке). Последовательность явлений, сопутствующих генерации РСП, может быть различной. Ясно только то, что выход частиц происходит в поздней части этой последовательности. Во всех событиях, кроме № 55 и № 61, одновременно с выходом частиц присутствовало радиоизлучение III типа; в событиях, № 55 и № 61 оно наблюдалось несколько раньше выхода частиц.

В табл. 2 приведены времена запаздывания выхода частиц из короны относительно явлений на Солнце. Отметим, что разброс этих значений велик. Во всех случаях вспышка в мягком и жестком рентгене, а также радиоизлучение II типа начинались раньше момента выхода частиц. За старт ВКМ принимался момент пересечения траектории ВКМ с поверхностью Солнца. В событии № 69 это произошло, в пределах точности определения, одновременно с выходом частиц. Наиболее компактно и с наименьшим опережением по отношению к выходу частиц наблюдался момент максимума рентгеновского излучения – как жесткого (среднее значение $\langle t \rangle = 1.8$ мин, среднеквадратичное отклонение $s = 4.9$ мин), так и мягкого ($\langle t \rangle = 6.9$ мин, $s = 7.5$ мин). В среднем, выход частиц из короны происходил через 13.6 мин после начала радиоизлучения II типа и через 15.9 мин после зарождения ВКМ.

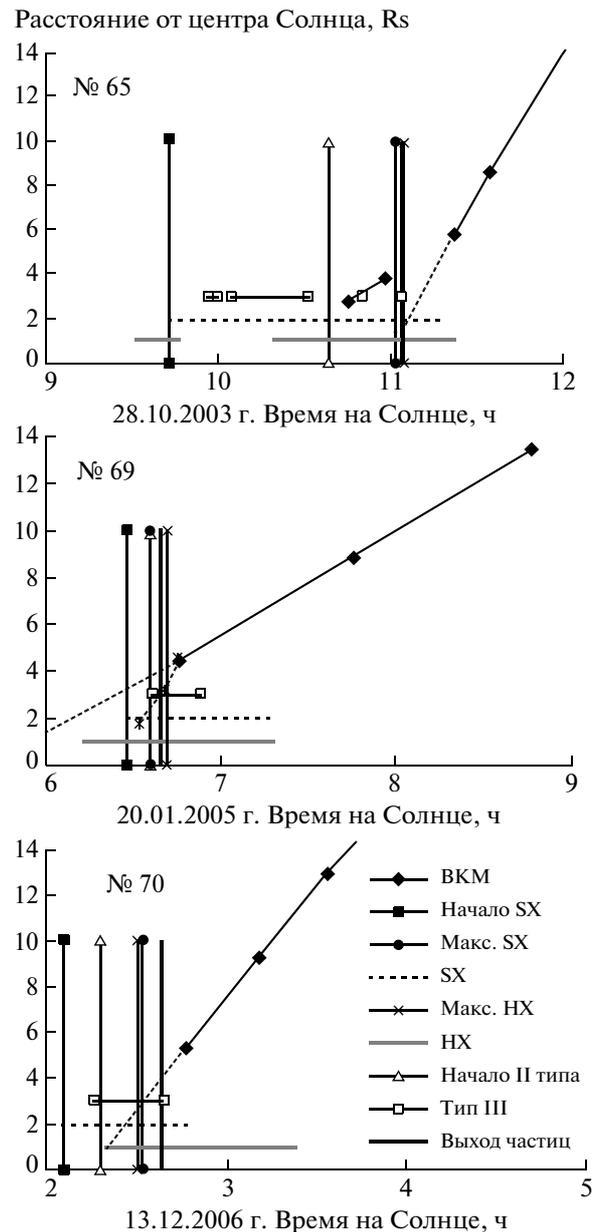


Рис. 1. Диаграммы зависимости высоты ВКМ от времени на Солнце: наклонная линия (пунктир – экстраполяция). В верхнем левом углу – номер события (GLE, см табл. 1), вертикальные отрезки указывают моменты явлений на Солнце (они не имеют отношения к высоте). Горизонтальный штрих – длительность всплеска мягкого рентгена, верхние горизонтальные отрезки – всплески радиоизлучения III типа, нижние горизонтальные отрезки – жесткий рентген.

4. УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В КОРОНЕ: РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ II ТИПА И ВЫБРОСЫ КОРОНАЛЬНОЙ МАССЫ

С ударными волнами в короне связывают радиоизлучение II типа и движение ВКМ. Логично предположить, что после крупной солнечной вспышки оба эти явления связаны с одной и той же ударной

Таблица 2. Запаздывание выхода частиц из короны относительно явлений на Солнце, мин

№ события	Дата	Начало SX	Макс. SX	Начало HX (E, МэВ)	Макс. HX	Начало II типа	Начало ВКМ
55	06.11.1997	25.4	19.4			21.4	30.9
59	14.07.2000	28.0	7.0			11.0	2.8
60	15.04.2001	36.4	5.3			8.3	16.0
61	18.04.2001	20.2	17.2			14.2	19.7
65	28.10.2003	81.4	2.3	43.62 (7–20)	–0.7	25.0	3.0
66	29.10.2003	18.4	6.4	17.7 (0.025–0.05)	7.6	13.3	10.1
67	02.11.2003	16.4	–5.6	11.04 (0.8–7)	–2.0	5.5	–0.7
69	20.01.2005	11.5	3.4	26.04 (0.3–0.8)	–2.5	3.4	43.8
70	13.12.2006	32.2	6.2	18 (7–20)	6.6	20.2	17.3
	Среднее	30.0	6.9	23.3	1.8	13.6	15.9
	Ср. кв. откл.	20.8	7.5	12.6	4.9	7.4	14.4

волной. Средняя скорость ВКМ в линейном ($V_{\text{вкм-лин}}$) и квадратичном ($V_{\text{вкм-кв}}$) приближениях приводится в <http://ares.nrl.navy.mil/cmelist.html>. В квадратичном приближении ее можно установить для каждого момента времени.

Скорость фронта, связанного с радиоизлучением II типа, ESS , также оценивается наблюдателями. Для одного и того же события разные обсерватории дают свои частоты наблюдения и свою оценку ESS . Мы рассматривали максималь-

ное значение ESS_{max} и среднее значение $\langle ESS \rangle$. Исходя из модельных представлений, скорость ударной волны в короне V_f можно определить по разности времени начала и конца радиоизлучения II типа и расстоянию излучающего фронта от центра Солнца в эти моменты времени. Расстояния можно определить, зная частоту радиоизлучения f и соотношение между высотой и частотой плазменных колебаний [Mann et al., 1999],

$$R/R_s = A/(A/R_s + 2 \ln(f/fs)), \quad (2)$$

где $A/R_s = 13.83$, $fs = 644$ МГц, R_s – радиус Солнца, R отсчитывается от центра.

Регистрация радиоизлучения II типа начинает, в среднем, на высоте $1.2R_s$ и заканчивается на высоте $1.8R_s$ (с небольшим разбросом). Однако, полученные согласно (2) значения V_f оказались значительно ниже $\langle ESS \rangle$. По-видимому, это связано с экспериментальными трудностями определения стартовой и конечной частот радиоизлучения и несоответствия среднего модельного распределения плотности короны реальным распределениям в каждом отдельном случае.

Интересно сравнить полученные скорости с альвеновской скоростью в короне, $V_A = B/(4\pi\rho)^{0.5}$, где B – индукция магнитного поля, ρ – плотность плазмы. Для определения концентрации плазмы n мы воспользовались моделью [Mann et al., 1999]: $n(R) = n_s \exp(A/R_s(R_s/R - 1))$, где $n_s = n(R = R_s) = 5.14 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$. Использовалась модель магнитного поля короны [Vainio and Khan, 2004]: $B = 1.7(R_s/R)^3 + 1.3(R_s/R)^2$.

На рис. 2 показаны значения альвеновской скорости V_A и значения скорости фронта волны в зависимости от высоты в короне. Скорость ВКМ $V_{\text{вкм-кв}}$ рассчитана для момента выхода частиц из короны и отнесена к высоте ВКМ в момент выхода частиц. Напомним, что эти значения получены из определений скорости ВКМ в картинной

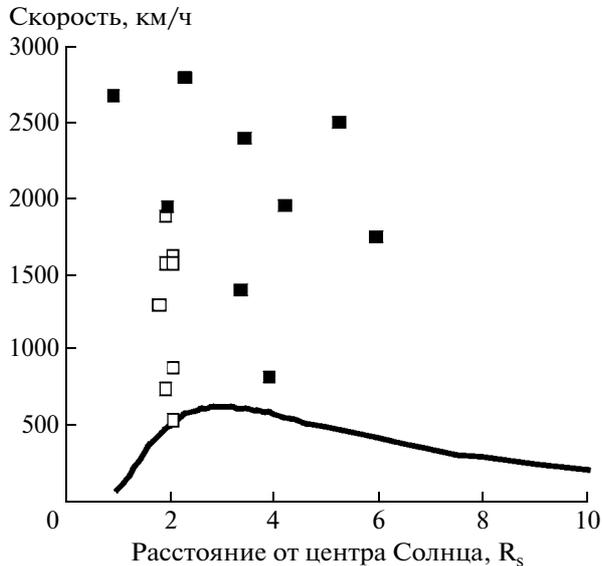


Рис. 2. Альвеновская скорость в короне, согласно моделям [Mann et al., 1999; Vainio and Khan, 2004], в зависимости от расстояния от центра Солнца (V_A , черная линия), скорость ВКМ в момент выхода частиц из короны ($V_{\text{вкм-кв}}$, темные квадраты) и скорость ударного фронта, определенная наблюдателями по радиоизлучению II типа, в момент конца радиоизлучения II типа ($\langle ESS \rangle$, светлые квадраты).

Таблица 3. Коэффициенты корреляции между значениями скорости фронта волны и скоростью ВКМ

	$V_{вкм_кв}$	$V_{вкм_лин}$	$V_{вкм_кв(II)}$	$\langle ESS \rangle$	ESS_{max}	V_{fmax}
$V_{вкм_кв}$	1					
$V_{вкм_лин}$	0.98	1				
$V_{вкм_кв(II)}$	0.89	0.96	1			
V_{fmax}	0.07	0.11	0.17	1		
ESS_{max}	-0.24	-0.19	-0.11	0.86	1	
V_{fmax}	-0.49 ± 0.15	-0.45 ± 0.16	-0.37 ± 0.17	0.33	0.67	1

плоскости. Средние значения $\langle ESS \rangle$ отнесены к высоте конца радиоизлучения II типа, рассчитанной по формуле (2). Видно, что для всех событий, кроме одного, $V_{вкм-кв}$ существенно превышает V_A , обеспечивая высокое число Маха $M = V_{вкм}/V_A$. В случае № 69 (самое низкое значение $V_{вкм-кв}$), возможно, присутствовал другой ВКМ, не отраженный в каталоге, но описанный в [Gopalswamy et al., 2005], см. рис. 1.

Значения V_{fmax} сравнительно малы, а значения $\langle ESS \rangle$ по порядку величины совпадают с $V_{вкм-кв}$, но корреляция между ними низкая. Здесь V_{fmax} – максимальная оценка из данных наблюдений разными станциями радиоизлучения II типа.

В табл. 3 даны коэффициенты корреляции между скоростями волны, полученными разными способами ($\langle ESS \rangle$, ESS_{max} , V_{fmax}) и скоростью ВКМ в линейном $V_{вкм-лин}$ и квадратичном $V_{вкм-кв}$ приближении. Рассмотрена также скорость ВКМ в квадратичном приближении в момент начала радиоизлучения II типа $V_{вкм-кв(II)}$.

Из независимых значений наибольшая корреляция имеет место между V_{fmax} и ESS_{max} , что неудивительно, так как они получены в одном измерении. Все остальные коэффициенты корреляции между значениями скорости ВКМ и оцененными значениями скорости ударной волны, связанной с радиоизлучением II типа, не являются значимыми. Возможно, это следствие того, что значения V_{fmax} , ESS и ESS_{max} модельно зависимы, а значения $V_{вкм}$ получены из определений скорости ВКМ в картинной плоскости. Тем не менее, из этого анализа не видно простой связи радиоизлучения II типа в короне с ВКМ для рассмотренных событий.

5. СООТНОШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЛЯТИВИСТСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОНОВ И ПАРАМЕТРОВ УДАРНЫХ ВОЛН В КОРОНЕ

Если ускорение РСП происходит на фронте ударной волны, то можно ожидать связи между параметрами протонов и волны. Из общих соображений, должна быть связь между скоростью волны, временем ускорения и потоком протонов. При ускорении на фронте ударной волны энергетический спектр частиц имеет степенной вид с показателем G :

$$G = (\sigma + 2)/(\sigma - 1), \tag{3}$$

где σ – степень сжатия вещества на фронте ударной волны [Бережко и др., 1988]: $\sigma = (\gamma + 1)M^2/((\gamma - 1)M^2 + 2)$, где $\gamma = 5/3$ – показатель адиабаты для полностью ионизованной нерелятивистской плазмы, M – число Маха. Таким образом, имея значения $V_{вкм}$ и V_A , можно оценить ожидаемый показатель спектра.

В работах [Вашенюк и др., 2007; Vashenyuk et al., 2007] поток первых РСП, полученный на основе данных всей сети нейтронных мониторов, описывается соотношением:

$$J(E) = J_0 \exp(-E/E_0), \tag{4}$$

где E – энергия частицы. Имеются значения J_0 и E_0 для всех рассматриваемых здесь событий, за исключением № 61 и № 66. Несмотря на разные формы представления спектра, в случае ускорения ударной волной должна наблюдаться отрицательная корреляция между G и характеристической энергией E_0 .

На рис. 3а представлена корреляция между величинами $J(E = 1 \text{ ГэВ})$, рассчитанными по формуле (4), и скоростью ВКМ $V_{вкм-кв}$ (для $V_{вкм-лин}$ результат тот же) для обсуждаемых событий. В случае вклада ВКМ в процесс ускорения первых частиц следовало бы ожидать положительной корреляции между этими величинами. В действительности, если корреляция и есть, она отрицательная и вряд ли значимая ($R_{cor} = -0.53 \pm 0.29$). В предположении, что ускорение первых протонов на фронте ударной волны началось в момент старта радиоизлучения II типа и проходило до момента выхода этих частиц из короны, на рис. 3б показана зависимость величины $J(E = 1 \text{ ГэВ})$ от предполагаемого времени ускорения. Никакой корреляции не обнаруживается. Тот же вывод можно сделать при рассмотрении рис. 3в, где представлено соотношение между спектральными характеристиками – значениями показателя G , рассчитанными по формуле (3), и значениями E_0 согласно работам [Вашенюк и др., 2007; Vashenyuk et al., 2007].

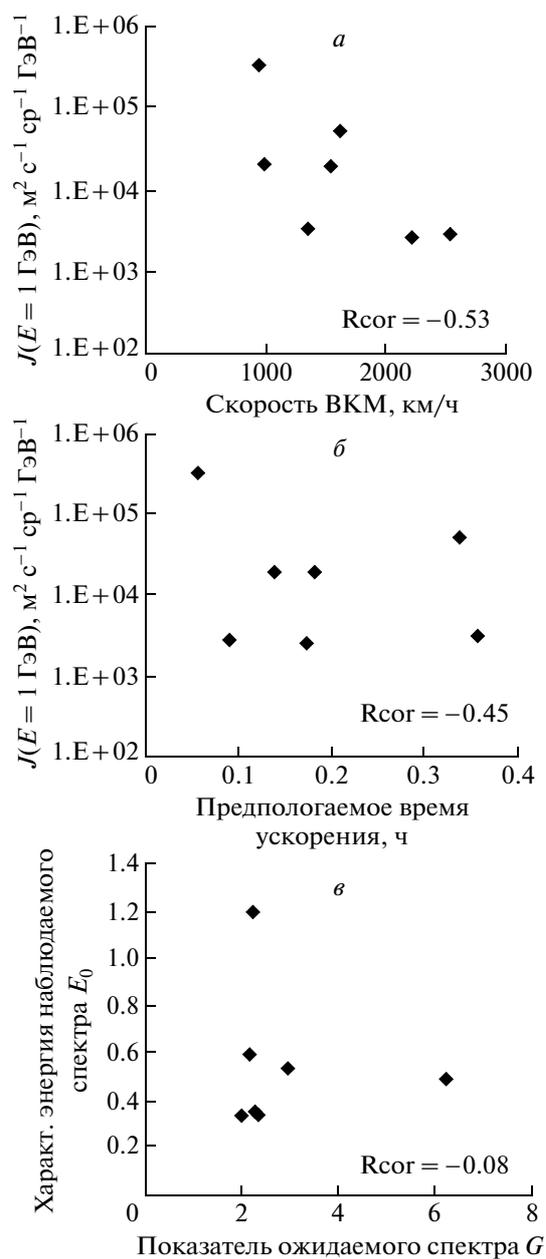


Рис. 3. Корреляция между наблюдаемой интенсивностью первых релятивистских протонов [Вашенюк и др., 2007; Vashenyuk et al., 2007] и скоростью ВКМ (а); то же, но для предполагаемой длительности ускорения (б); корреляция между характеристической энергией энергетического спектра первых релятивистских протонов [Вашенюк и др., 2007; Vashenyuk et al., 2007] и показателем ожидаемого энергетического спектра при ускорении на фронте ударной волны, связанной с ВКМ (в).

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Мы выполнили анализ первого прихода на Землю релятивистских протонов 9 крупных событий СКЛ 23-го солнечного цикла и сопутствующих явлений в короне — рентгеновского и ра-

диоизлучения, а также ВКМ. Выход протонов из короны запаздывает относительно других проявлений взрывного энерговыделения на Солнце. Наименьшее запаздывание наблюдается относительно максимума излучения в жестком рентгене (среднее ~2 мин) и мягком рентгене (среднее ~7 мин, но известно, что этот максимум может быть достаточно широким). На самом деле, запаздывание может быть на ~1.5 мин меньше из-за сделанного нами предположения, что первые частицы двигались с нулевым питч-углом [Klein and Posner, 2005]. В то же время разброс времени запаздывания довольно широк. Самое большое запаздывание (~20 мин относительно максимума мягкого рентгена) наблюдалось в событии № 55 (6.11.1997 г.), что дало основание авторам работы [Tylka et al., 2003] связать протоны с ускорением на ударной волне. Но это запаздывание могло быть обусловлено трудностью выхода из-за сложной структуры коронального магнитного поля с малым числом открытых силовых линий, о чем говорит слабое радиоизлучение III типа. Такая же ситуация с радиоизлучением III типа была в событии №61 (18.04.2001 г., запаздывание 17 мин), когда вспышка была за лимбом. В пользу ускорения первых релятивистских частиц во вспышке говорит одновременность выхода частиц и гамма-излучения высокой энергии от распада пионов в событиях № 65 и № 69 [Kuznetsov et al., 2005a, b], что является прямым указанием на ускорение субрелятивистских протонов во время вспышки. С другой стороны, не обнаружена корреляция между наблюдаемой интенсивностью первых частиц $J(E)$ [Вашенюк и др., 2007; Vashenyuk et al., 2007] и временем развития ударной волны в короне от момента начала радиоизлучения II типа до момента выхода ускоренных частиц из короны. Нет корреляции между интенсивностью первых релятивистских частиц и скоростью выброса корональной массы. Вычисленные из характеристик ударной волны в короне показатели ожидаемого энергетического спектра протонов и характерная энергия наблюдаемого спектра (в экспоненциальном представлении) также не коррелируют между собой. Эти факты показывают, что релятивистские протоны, первыми приходящие к Земле во время мощных взрывных энерговыделений на Солнце, скорее всего, были ускорены во вспышечном процессе. Другое указание на необходимость вспышки для ускорения протонов до релятивистских энергий мы видим в гелиодолготном распределении родительских вспышек, после которых наблюдались солнечные протоны. В работе [Базилевская и др., 2003] было показано, что протоны с $E > 1000$ МэВ приходят на Землю только после солнечных вспышек западного полушария Солнца (связанного с земным наблюдателем силовыми линиями ММП), тогда как вспышки, после которых наблюдались протоны с $E < 500$ МэВ,

распределены по долготе практически равномерно. Это является аргументом в пользу ускорения протонов до энергий менее 500 МэВ на фронте ударной волны с широкими угловыми размерами и отсутствия такого ускорения до энергий выше 1000 МэВ.

Не обнаружено корреляции между скоростью ВКМ и скоростью ударной волны в короне, оцениваемой по наблюдениям радиоизлучения II типа в диапазоне 25–300 МГц. Это может быть связано с неточностью определения скоростей, и в этом вопросе необходимо разбираться в дальнейшем.

Авторы благодарны И.М. Чертку за обсуждение результатов по радиоизлучению. Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 05-02-16185а, 05-02-17346а, 07-02-01019а, 07-02-10018к), а также Программы фундаментальных исследований Президиума РАН “Нейтринная физика”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Базилевская Г.А., Крайнев М.Б., Махмутов В.С., Свиржевская А.К., Свиржевский Н.С., Вашенюк Э.В.* Солнечные протонные события по наблюдениям в стратосферном эксперименте ФИАН // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 43. № 4. С. 442–452. 2003.
- *Бережко Е.Г., Елиин В.К., Крымский Г.Ф., Петухов С.И.* Генерация космических лучей ударными волнами. М.: Наука, 181 с. 1988.
- *Вашенюк Э.В., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б.* Релятивистские солнечные протоны в событии 20 января 2005 г. Модельные исследования // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 46. № 4. С. 449–455. 2006.
- *Вашенюк Э.В., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Мирошниченко Л.И.* Характеристики релятивистских СКЛ в крупных событиях на уровне Земли 1956–2005 гг. // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 71. № 7. С. 968–971. 2007.
- *Bieber J.W., Evenson P., Droege W., Pyle R., Ruffolo D., Rujiwarodom M., Tooprakai P., Khumlumlert T.* Space-ship Earth observations of the easter 2001 solar particle event // *Astrophys. J.* V. 601. P. L103–L106. 2004.
- *Cane H.V., Erickson W.C., Prestage N.P.* Solar flares, type III bursts, coronal mass ejections, and energetic particles // *J. Geophys. Res.* V. 107, № A10. Doi:10.1029/2001JA000320. P. SSH 14–1 – 14–19. 2002.
- *Gopalswamy N., Xie H., Yashiro S., Usoskin I.* Coronal mass ejections and ground level enhancements // *Proc. 29th Intern. Cosmic Ray Conf. Pune, India.* V. 1. P. 169–172. 2005.
- *Kahler S.W.* Injection profiles of solar energetic particle as functions of coronal mass ejection heights // *Astrophys. J.* V. 428. P. 837–842. 1994.
- *Klein K.-L., Posner A.* The onset of solar energetic particle events: prompt release of deka-MeV protons and associated coronal activity // *Astron. & Astrophys.* V. 438. P. 1029–1042, Doi: 10.1051/0004–6361:20042607. 2005.
- *Kuznetsov S.N., Kurt V.G., Yushkov B.Yu., Myagkova I.N., Kudela K. et al.* 28 October 2003 flare: high-energy gamma emission, type II radio emission and solar particle observations // *Intern. J. Mod. Phys. A.* V. 20. № 29. P. 6705–6707. 2005a.
- *Kuznetsov S.N., Kurt V.G., Yushkov B.Yu., Myagkova I.N., Kudela K., Kassovicova J., Slivka M.* // Proton acceleration during 20 January 2005 solar flare: CORONAS-F observations of high-energy gamma emission and GLE // *Proc. 29th Intern. Cosmic Ray Conf. Pune, India.* V. 1. P. 49–52. 2005b.
- *Lockwood J.A., Webber W.R., Hsieh L.* Solar flare proton rigidity spectra deduced from cosmic ray neutron monitor observations // *J. Geophys. Res.* V. 79. P. 4149–4155. 1974.
- *Mann G., Jansen F., MacDovall R.J., Kaiser M.L., Stone R.G.* // A heliospheric density model and type III radio bursts // *Astron. & Astrophys.* V. 348. P. 614–620. 1999.
- *Reames D.V.* Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere // *Space Sci. Rev.* V. 90. P. 413–491. 1999.
- *Tylka A.J., Cohen C.M.S., Dietrich W.F., Krucker S., McGuire R.E., Mewaldt R.A., Ng C.K., Reames D.V., Share G.H.* Onsets and release times in solar particle events // *Proc. 28th Intern. Cosmic Ray Conf. Tsukuba, Japan.* V. 6. P. 3305–3308. 2003.
- *Vainio R., Khan J.I.* Solar energetic particle acceleration in refracting coronal shock waves // *Astrophys. J.* V. 600. № 1. P. 451–457. 2004.
- *Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Miroshnichenko L.I., Perez-Peraza J., Gallegos-Cruz A.* Relativistic solar cosmic ray events (1956–2006) from GLE modeling studies // *Proc. 30th Intern. Cosmic Ray Conf. Merida, Mexico.* 2007.