

УДК 537.591.5

КОНЦЕПЦИЯ ДВУХ КОМПОНЕНТ СКЛ: СОЛНЕЧНЫЕ И МЕЖПЛАНЕТНЫЕ АСПЕКТЫ

© 2009 г. Л. И. Мирошниченко¹, Э. В. Вашенюк², Х. Перес-Пераса³

E-mail: leonty@izmiran.ru

Обсуждаются солнечные и межпланетные аспекты, связанные с наблюдениями и интерпретацией двух компонент релятивистских СКЛ: импульсной (быстрой) и запаздывающей (медленной). Быстрая компонента обладает высокой анизотропией и экспоненциальным энергетическим спектром. Медленная компонента имеет большую изотропную составляющую и степенной энергетический спектр. Рассмотрение наблюдательных и теоретических аргументов показывает, что причиной разделения на компоненты является скорее всего не межпланетное распространение, а генерации СКЛ в модели с двумя источниками в рамках концепции о многократном ускорении СКЛ в солнечной атмосфере.

ВВЕДЕНИЕ

Как показано авторами ранее [1–4], ряд событий СКЛ на поверхности Земли (GLE) отчетливо демонстрируют выраженную двухкомпонентную структуру в виде быстрой компоненты (БК) и запаздывающей, медленной компоненты (МК). Они отличаются друг от друга временными профилями интенсивности (импульсообразная или плавная форма), пикч-угловыми распределениями (сильная анизотропия или почти изотропия), формой энергетических спектров (жесткий экспоненциальный или мягкий степенной). В частности, в начале события GLE быстрая компонента является сильно анизотропной. Частицы БК предположительно ускоряются в процессах магнитного пересоединения в нижних слоях короны в момент, близкий к взрывной фазе вспышки и началу радиовсплеска II типа [1, 5]. С другой стороны, частицы МК могут быть ускорены стохастическим механизмом в замкнутых магнитных структурах низко в короне и затем выносятся во внешнюю корону расширяющимся выбросом коронального вещества (ВКВ) [2, 6].

Теоретически медленную компоненту можно рассматривать (см., например, [7]) как результат трансформации выброшенного Солнцем пучка частиц (быстрой компоненты) в процессе межпланетного распространения СКЛ (их рассеяния на неоднородностях ММП). Однако детальная физическая картина процессов, приводящих к начальному импульсообразному максимуму и, в целом, к двухпиковой структуре в некоторых событиях, до конца не ясна. Опираясь на экспериментальные и модельные результаты [3, 4], мы приходим к выво-

ду, что гипотеза “межпланетного источника” двух компонент не может разрешить все проблемы событий с релятивистскими СКЛ. Напротив, есть достаточно веские основания принять модель генерации СКЛ с двумя источниками на Солнце в рамках концепции о многократном ускорении СКЛ в солнечной атмосфере [8].

ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ О ДВУХ КОМПОНЕНТАХ СКЛ

Ярким примером, демонстрирующим существование двух компонент релятивистских СКЛ, является событие (GLE) 28 октября 2003 г. Оно было связано со вспышкой балла 4В/Х17.2, наблюдавшейся в области с гелиокоординатами S16, E08. Начало радиовсплеска II типа отмечено в 11:02 UT. На рис. 1а [9] показаны возрастания на нейтронных мониторах (НМ) Норильск и Мыс Шмидта, демонстрирующие характерные профили быстрой и запаздывающей компонент. Короткое импульсообразное возрастание на профиле станции Норильск обусловлено БК. Профиль возрастания на станции м. Шмидта состоит из двух пиков. Небольшой первый максимум, совпадающий по времени с пиком на ст. Норильск, соответствует БК, а последующее плавное возрастание – МК. На рис. 1б и 1в соответственно приведены спектры, полученные методами оптимизации из данных нейтронных мониторов в двойном и полулогарифмическом масштабах. Видно, что, в пределах методических погрешностей, спектр быстрой компоненты (1) имеет экспоненциальную зависимость от энергии $\{J = 1.2 \cdot 10^4 \exp(-E/0.59)\}$, а спектр медленной компоненты (2) – степенную $\{J = 1.5 \cdot 10^4 E^{-4.4}\}$.

Событие 28.10.2003 г. является одним из многих GLE, где произошло разделение потоков быстрой и медленной компонент. Именно сильно коллимированный поток БК был отклонен находившейся

¹ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН им. Н.В. Пушкова, Троицк.

² Полярный геофизический институт, Апатиты.

³ Институт геофизики Национального автономного университета Мехико, Мексика.

на его пути непосредственно перед Землей неоднородностью (локальным изгибом) в ММП. Частицы медленной компоненты с широким питч-угловым распределением сравнительно беспрепятственно прошли через изгиб [9].

ВЛИЯНИЕ МЕЖПЛАНЕТНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ

К двухпиковой структуре потока СКЛ, внешне похожей на профили (рис. 1а), приводит теоретическое исследование распространения энергичных солнечных частиц в ММП в режиме так называемой фокусированной диффузии [7, 10, 11]. При определенном соотношении между процессами рассеяния и адиабатической фокусировки в расходящейся структуре ММП может произойти их взаимная компенсация для некоторой группы частиц. Эти частицы движутся сконцентрированным сгустком впереди основной их массы, распространяющейся диффузионным путем (диффузионное облако). Пример такого “суперкогерентного” распространения СКЛ с энергией >5 МэВ по наблюдениям на КА Helios на небольшом (0.3 а.е.) расстоянии от Солнца описан в [12]. Для релятивистских солнечных протонов вследствие большего транспортно-го пробега суперкогерентная мода распространения теоретически могла бы наблюдаться и у Земли. Существенной особенностью, однако, является то, что средний питч-угол частиц в “суперкогерентном” пучке составляет ~50° [7]. Соответственно средняя скорость перемещения частиц “суперкогерентного” пика равна половине полной скорости частиц ($v/2$).

Как известно, в большинстве случаев начало возрастания на нейтронных мониторах запаздывает относительно взрывной фазы вспышки на ~11 мин, что соответствует времени прямого распространения (с нулевым питч-углом) от Солнца до Земли релятивистских солнечных протонов вдоль средней силовой линии ММП (1.2 а.е.) [13]. Эти так называемые “первые частицы” принадлежат быстрой компоненте СКЛ. Из анализа многих событий следует, что они распространяются коллимированным пучком, имея весьма малые питч-углы [3, 4]. Это было подтверждено и непосредственными измерениями на мюонном годоскопе МИФИ “Ураган” [14], который зафиксировал коллимированный поток частиц быстрой компоненты в событии 13 декабря 2006 г. Таким образом, распространение частиц быстрой компоненты РСП существенно отличается от “суперкогерентной” моды. Относительно коллимации частиц БК следует предположить, что сильная фокусировка частиц происходит уже вблизи Солнца и, в условиях слабого межпланетного рассеяния, сохраняется при распространении до Земли.

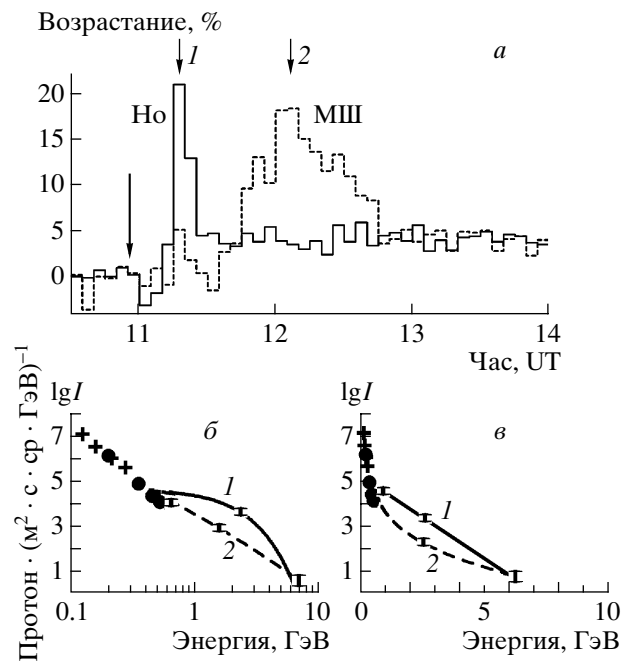


Рис. 1. Событие 28 октября 2003 г. Быстрая (1) и запаздывающая (2) компоненты РСП в профилях возрастаний на нейтронных мониторах станций Норильск и м. Шмидта (а). Вертикальная стрелка – вероятный момент генерации СКЛ. Спектры РСП, полученные из данных наземных измерений (1 – быстрая компонента, 2 – запаздывающая) в двойном логарифмическом (б) и полулогарифмическом масштабе (в). Приведены также данные прямых измерений солнечных протонов на шарах-зондах (крестики) и КА GOES-11 (кружки).

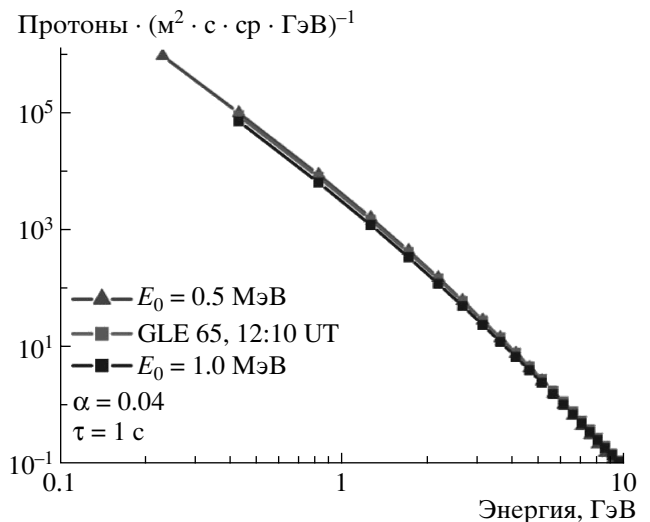


Рис. 2. Сравнение спектров медленной компоненты в событии 28 октября 2003 г., полученных из экспериментальных данных (GLE65) и путем расчета ускорения протонов в турбулентной плазме при различных начальных энергиях E_0 [18].

Параметры экспоненциального $J = J_0 \exp(-E/E_0)$ и степенного $J = J_1 E^{-\gamma}$ спектров для событий GLE 1956–2006 гг.

№	№ GLE	Дата события	Начало радиовсплеска II типа	Балл вспышки	Гелиокоординаты	Быстрая компонента		Медленная компонента	
						J_0	E_0	J_1	$-\gamma$
1	05	23.02.1956	03:31*	3B	N23W80	$7.4 \cdot 10^5$	1.37	$5.5 \cdot 10^5$	4.6
2	31	07.05.1978	03:27	1B/X2	N23W82	$3.5 \cdot 10^4$	1.11	$1.3 \cdot 10^4$	4.0
3	38	07.12.1982	23:44	1B/X2.8	S19W86	$5.7 \cdot 10^3$	0.65	$7.2 \cdot 10^3$	4.5
4	39	16.02.1984	09:00	–	– W132	–	–	$5.2 \cdot 10^4$	5.9
5	42	29.09.1989	11:33	–/X9.8	– W105	$1.5 \cdot 10^4$	1.74	$2.5 \cdot 10^4$	4.1
6	44	22.10.1989	17:44	2B/X2.9	S27W31	$7.5 \cdot 10^4$	0.91	$1.5 \cdot 10^4$	6.1
7	47	21.05.1990	22:12	2B/X5.5	N35W36	$6.3 \cdot 10^3$	1.13	$2.7 \cdot 10^3$	4.3
8	55	06.11.1997	11:53	2B/X9.4	S18W63	$8.3 \cdot 10^3$	0.92	$8.2 \cdot 10^3$	4.6
9	59	14.07.2000	10:19	3B/X5.7	N22W07	$3.3 \cdot 10^5$	0.50	$5.0 \cdot 10^4$	5.4
10	60	15.04.2001	13:48	2B/X14.4	S20W85	$1.3 \cdot 10^5$	0.62	$3.5 \cdot 10^4$	5.3
11	65	28.10.2003	11:02	4B/X17.2	S16E08	$1.2 \cdot 10^4$	0.60	$1.5 \cdot 10^4$	4.4
12	67	02.11.2003	17:14	2B/X8.3	S14W56	$4.6 \cdot 10^4$	0.51	$9.7 \cdot 10^3$	6.3
13	69	20.01.2005	06:44	2B/X7.1	N14W61	$2.5 \cdot 10^6$	0.49	$7.2 \cdot 10^4$	5.6
14	70	13.12.2006	02:51	2B/X3.4	S06W24	$3.5 \cdot 10^4$	0.59**	$4.3 \cdot 10^4$	5.7

* Начало радиовсплеска на частоте 3.3 ГГц.

** В событии GLE70 в начальной фазе спектр имеет переменный наклон и не соответствует точно экспоненциальной зависимости. Приведенные параметры спектра БК указаны для наилучшего приближения экспоненциального спектра к спектру, полученному в процессе оптимизации.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР

Как показал анализ большого числа событий GLE [1–6] (таблица), спектр быстрой компоненты имеет экспоненциальную зависимость от энергии, а медленной – степенную. Объяснить такое специфическое разделение по энергиям одними процессами рассеяния и фокусировки в межпланетном пространстве довольно сложно. При средних длинах межпланетного транспортного пробега от 0.1 до 1 а.е. [15, 16] трудно представить, чтобы релятивистские солнечные протоны на пути от Солнца до Земли могли существенно изменить свою энергию. Более резонно предположение о различных источниках ускоренных частиц на Солнце. Данные о развитии активных процессов на Солнце и сопровождающих их излучений представляют свидетельства большого разнообразия возможных процессов генерации энергичных частиц. Все известные механизмы ускорения частиц могут быть сведены к трем основным [16]: ускорение электрическим полем, ускорение на ударных волнах в солнечной атмосфере и стохастическое ускорение плазменной МГД-турбулентностью. Как показано в [1, 5], наиболее вероятным механизмом ускорения БК является ускорение электрическим полем в пересоединяющихся корональных токовых слоях. Такой механизм дает экспоненциальный энергетический спектр, близкий к наблюдаемому спектру БК [1–5]. Наиболее вероятными механизмами

генерации для МК могут быть ускорение на ударной волне близи Солнца [17] и ускорение МГД-турбулентностью во вспышечном выбросе [18].

Применимость механизма [18] была проверена нами на ряде событий. На рис. 2 сравнивается спектр МК, полученного из экспериментальных данных в событии 28.10.2003 г. (рис. 1б), со спектром, рассчитанным по модели стохастического ускорения [18]. При параметрах модели, соответствующих реальным условиям, видно хорошее согласие экспериментального спектра с расчетным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наличие двух компонент релятивистских СКЛ с различными свойствами требует, по-видимому, существенного пересмотра концепции GLE в целом. Опираясь на результаты [19] по развитию выброса коронального вещества (ВКВ) в магнитных структурах солнечной короны, мы предложили один из возможных сценариев генерации двух компонент [2, 3, 18]. Физические условия и механизмы, лежащие в основе образования начальных импульсов и двухпиковой структуры GLE, изучены все еще недостаточно. Вместе с тем детальное рассмотрение наблюдательных и теоретических аргументов показывает, что причина разделения на компоненты скорее всего не межпланетное пространство, а генерации СКЛ в модели с двумя источниками непосредственно на Солнце в рамках

концепции о многократном ускорении частиц в солнечной атмосфере.

Работа поддержана РФФИ, грант № 07-02-01405, а также грантом НШ-4573.2008.2 и КОНАСИТ Мексики, проект 45822PERPJ10332.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Перес-Пераса Х., Гальегос-Крус А., Ващенко Э.В., Мирошниченко Л.И.* // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т. 32. № 2. С. 2.
2. *Miroshnichenko L.I., Perez-Peraza J., Vashenyuk E.V. et al.* // High Energy Solar Physics, AIP Conf. Proc. 1996. V. 374. P. 140.
3. *Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Perez-Peraza J. et al.* // Adv. Space Res. 2006. V. 38. № 3. P. 411.
4. *Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Miroshnichenko L.I. et al.* // Proc. 30th ICRC. Merida, Mexico. 2007. V. 1. P. 253.
5. *Балабин Ю.В., Ващенко Э.В., Мингалев О.В. и др.* // Астрон. журн. 2005. Т. 82. № 10. С. 940.
6. *Perez-Peraza J., Gallegos-Cruz A., Miroshnichenko L.I., Vashenyuk E.V.* // Proc. 30th ICRC. Merida, Mexico. 2007. V. 1. P. 117.
7. *Earl J.A.* // Astrophys. J. 1976. V. 205. P. 900.
8. *Miroshnichenko L.I., Perez-Peraza J.* // Int. J. Modern Phys. 2008. V. 23. № 1. P. 1.
9. *Miroshnichenko L.I., Klein K.-L., Trotter G. et al.* // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. № 9, A09S08; doi: 10.1029/2004JA010936 (13 p.).
10. *Топтыгин И.Н.* Космические лучи в межпланетных магнитных полях. М.: Наука, 1983.
11. *Базилевская Г.А., Голынская Р.М.* // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т. 29. № 2. С. 204.
12. *Bieber J.W., Earl J.A., Green G. et al.* // J. Geophys. Res. A. 1980. V. 85. № 5. P. 2313.
13. *Cliver E.W., Kahler S.W., Shea M.A., Smart D.F.* // Astrophys. J. 1982. V. 260. P. 362.
14. *Timashkov D.A., Balabin Yu.V., Borog V.V. et al.* // Proc. 30th ICRC. Merida, Mexico. 2007. V. 1. P. 209.
15. *Bieber J.W., Matthaeus W.H., Smith C.W. et al.* // Astrophys. J. 1994. V. 420. P. 294.
16. *Miroshnichenko L.I.* Solar Cosmic Rays. Kluwer: Acad. Publ., 2001. P. 492.
17. *Бережко Е.Г., Танеев С.Н.* // Письма в "Астрон. журн." 2003. Т. 29. № 8. С. 601.
18. *Perez-Peraza J., Gallegos-Cruz A., Vashenyuk E.V. et al.* // Adv. Space Res. 2006. V. 38. № 3. P. 418.
19. *Manoharan P.K., Kundu M.R.* // Astrophys. J. 2003. V. 592. P. 597.