

УДК 523.165

© 1995 г. Ю. И. ЛОГАЧЕВ, В. Г. СТОЛПОВСКИЙ, Е. И. ДАЙБОГ,
Г. ЭРДЕШ, К. КЕЧКЕМЕТИ, А. ВАРГА, М. И. ВЕРИГИН, Г. А. КОТОВА

СОБЫТИЯ С СОЛНЕЧНЫМИ ЭНЕРГИЧНЫМИ ЧАСТИЦАМИ НА ВОСХОДЯЩЕЙ ФАЗЕ 22-ГО ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА КА «ФОБОС-2»

На космическом аппарате «Фобос-2» в эксперименте с полупроводниковым телескопом LET было зарегистрировано более 40 событий в солнечных энергичных частицах. В точке наблюдения на гелиоцентрических расстояниях 1,0—1,6 а. е. максимальные потоки вспышечных электронов с энергией $E \approx 0,35-1,5$ МэВ, протонов с $E_p \approx 9-19$ МэВ и α -частиц с $E_\alpha \approx 1,8-3,7$ МэВ/нуклон составляли $\sim 10^{-1}-2 \cdot 10^2$, $10^{-2}-5 \cdot 10^2$ и $3 \cdot 10^{-2}-1,5 \cdot 10^2$ см $^{-2}$ с $^{-1}$ ср $^{-1}$ соответственно. Были проанализированы временные профили интенсивности частиц и проведено сопоставление этих событий с всплесками вспышечного электромагнитного излучения. Полученные результаты показывают, что компонента энергичных частиц, ускоренных во вспышке, идентифицируется вплоть до расстояний $\sim 1,6$ а. е. даже в случае очень больших угловых расстояний между солнечной вспышкой и проекцией точки наблюдения на Солнце по силовым линиям межпланетного магнитного поля.

Введение

Эксперимент с телескопом частиц малых энергий LET (Low Energy Telescope) осуществлялся на КА «Фобос-2» с июня 1988 по март 1989 г. По времени эксперимент совпал с переходом от квазистационарных рекуррентных потоков солнечного ветра (СВ) к спорадическим возмущениям в СВ, характерным для солнечного максимума. Эти возмущения, обусловленные вспышками и выбросами коронального вещества, сопровождалась ударными волнами и возрастаниями интенсивности энергичных частиц в межпланетном пространстве. В эксперименте LET было зарегистрировано несколько десятков событий в энергичных частицах, однако пока рассмотрены только наиболее сильные из них (в основном инициированные вспышками в АО 5395, начиная с известной вспышки 6.03.1989 г.) [1—4].

Между тем эксперимент LET обладает рядом преимуществ по сравнению с другими подобными измерениями. Дело в том, что орбита КА «Фобос-2» позволяла изучать события в частицах от очень далеких западных вспышек. При наблюдениях на околоземных орбитах такие события относят к так называемым залимбовым вспышкам, и для них принципиально невозможно получить данные об условиях на Солнце и в короне.

Кроме того, в данном эксперименте имеется возможность исследовать временные профили интенсивности и энергетические спектры частиц на далеких восточных флангах межпланетных ударных волн и изучать эффективность ускорения на ударной волне в зависимости от азимута. При постепенном увеличении гелиоцентрического расстояния большое число событий в солнечных энергичных частицах дает возможность уточнить относительные вклады импульсного ускорения во вспышке, ускорения на ударных волнах в короне и в межпланетном пространстве в наблюдаемые потоки частиц. Считается, что эти вклады различны

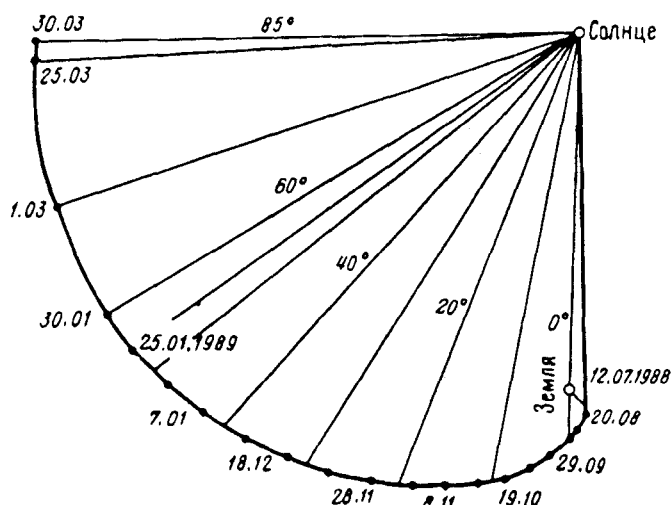


Рис. 1. Орбита КА «Фобос-2» в полярных координатах с фиксированной осью Солнце — Земля

для импульсных и длительных вспышек и в случае последних большая доля частиц в событии, если не все, ускорена ударной волной по мере ее движения от Солнца [5—7]. Эксперимент LET позволяет проверить эти заключения для расстояний вплоть до 1,5 а. е.

1. Описание эксперимента

Данные получены на КА «Фобос-2» при пролете к Марсу и на круговой орбите вблизи него. На рис. 1 в координатах с фиксированной осью Земля — Солнце показано положение КА во время проведения эксперимента.

Прибор LET представляет собой четырехэлементный полупроводниковый телескоп в активной «антисовпадательной» защите. dE/dx , E -методика использовалась для определения энергии E и заряда Z частицы. Подробно прибор LET описан в [8].

Протоны регистрировались в интервале 0,9—19 МэВ в пяти каналах, α -частицы — в интервале 1—19 МэВ/нуклон в четырех каналах, ядра от Li, Be, B до $Z > 20$ в интервале 2,3—75 МэВ/нуклон — в восьми каналах. Один канал был отдан электронам с $E_e \sim 0,35$ —1,5 МэВ. Протоны и α -частицы с энергией 1—2 МэВ/нуклон регистрировались детектором со светосилой 4 см² ср, остальные частицы — со светосилой 0,58 см² ср.

Телескоп LET был установлен на вращающейся платформе, которая проходила интервал углов от 60 до 115° относительно оси КА — Солнце за 20 мин, останавливаясь в пяти положениях на 4 мин в каждом. Протоны и α -частицы регистрировались по каждому из секторов, счет ядер и электронов суммировался за время полного поворота платформы.

При анализе мы использовали также данные о СВ и межпланетном магнитном поле (ММП), полученные на КА «Фобос-2» (приборы ТАУС и FGMM соответственно [9]).

2. Отбор событий

На рис. 2 показаны скорости счета протонов (9—19 МэВ), электронов (0,35—1,5 МэВ) и ядер CNO (3,2—7,5 МэВ/нуклон) во время эксперимента LET на «Фобос-2». Видно, что амплитуда возрастаний интенсивности частиц больше трех порядков по величине и они часто имеют вид, типичный для вспышечных событий.

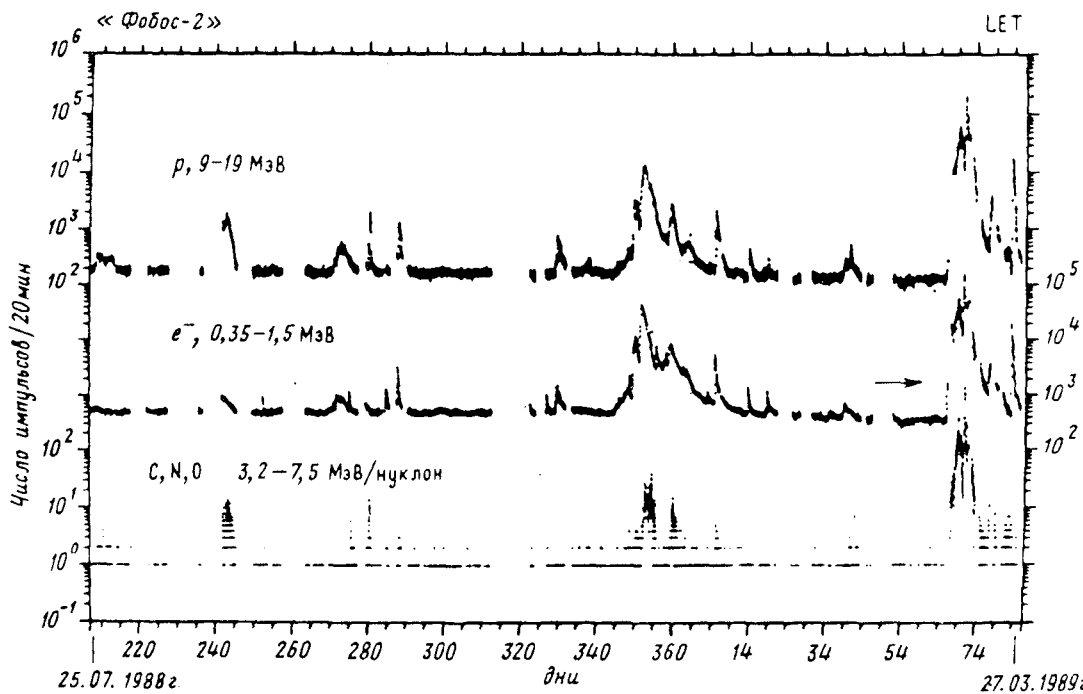


Рис. 2. Временные вариации потоков протонов (p) с энергией $E_p = 9-19$ МэВ, электронов (e) с $E_e = 0,35-1,5$ МэВ и ядер CNO с $E_{CNO} = 3,2-7,5$ МэВ/нуклон по наблюдениям на КА «Фобос-2» в период с 25.06.1988 г. по 27.03.1989 г. Для каждой из компонент приведены числа отсчетов детектора за 20 мин

Отбор событий осуществлялся по наиболее быстрым частицам — электронам. Мы отбирали события, у которых:

— интенсивность в максимуме $J_m \geq 5\sigma (J_b)$, где J_b — фоновая интенсивность. Из рис. 2 следует, что это события с $J_m \geq 0,1 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$, т. е. эксперимент дает возможность рассматривать события более слабые, чем в других исследованиях [10—12];

— существует дисперсия во временах начала и максимума для электронов и протонов и ядер различных энергий;

— длительность возрастания не менее 2 ч и временной профиль интенсивности электронов близок к диффузионному, т. е. требовался относительно крутой рост интенсивности в начале события, максимум до прихода ударной волны (если она сопровождала события) и постепенный спад после максимума.

Полученная статистика включает 46 событий. Они приведены в табл. 1—3. Для идентификации вспышек, вызвавших возрастания, использовалась общепринятая методика. Времена вспышек в H_a брались из сборника «Solar Geophysical Data». Для оценки времени первого прихода электронов в точку наблюдения принималось, что скорость электронов соответствует энергии $E_e = 0,35$ МэВ, и считалось, что эти электроны движутся без рассеяния по паркеровской спирали. Длина пути электрона оценивалась по методу [13] с учетом измеренной скорости СВ. Разность во временах начала электронных событий и солнечных вспышек ($\Delta t = T_e - T_p$) находится в пределах 20—120 мин. Такой разброс в величине Δt представляется естественным, если учесть постепенное увеличение гелиоцентрического расстояния до КА, а также широкий интервал угловых расстояний $\Delta\phi$ между основанием магнитной силовой линии, связанной с точкой наблюдения, и областью вспышки; $\Delta\phi$ оценивалось по методу [13] с учетом измеренной скорости СВ.

Все события разделены на три группы в зависимости от $\Delta\phi$ (знак «+» относится к вспышкам западнее КА, знак «—» восточнее): $|\Delta\phi| \leq 30^\circ$ — область опти-

Солнечные события в электронах на КА «Фобос-2» при $|\phi| < 30^\circ$

Дата события	Электроны, $E_e > 0,35$ МэВ				Вспышка					Геометрия	
	T_e , UT, час. мин	J_m	J_{ml}	$\lambda_{ }$, а. е.	T_f , UT, час. мин	гелио- долгота	X_r	тип РИ	дли- тель- ность	r , а. е.	$\Delta\phi$, град
1988 г.											
08.09	19.05	0,73	1,2	0,12	18.40	W27	M1,2	II	I	1,13	09
27.09	03.05	0,26	0,44	0,12	02.41	W26	C5,0	—	G	1,19	-28
01.10	07.45	0,79	1,4	0,26	07.22	W75	M1,8	II	I	1,20	+23
10.10	<19.05	1,0	1,9	0,13	18.03	W47	M2,7	—	G	1,24	-02
13.10	20.45	3,6	7,0	0,13	20.30	W88	M6,4	IV ¹	G	1,25	+28
21.11	23.05	0,64	1,7	0,15	22.50	W56	M1,6	II, IV	I	1,38	+13
13.12	<11.25	0,8	2,0	0,10	10.28	W37	C7,6	—	I	1,43	-12
13.12	14.45	0,57	1,7	0,27	14.05	W06	C6,5	—	I	1,43	-18
22.12	11.45	0,6	1,8	0,26	10.52	W42	C9,4	—	I	1,46	+22
22.12	23.45	2,9	9,0	0,13	23.07	W41	M5,3	II, IV	G	1,46	+23
24.12	03.05	2,9	9,2	0,18	02.01	FPR	M2,9	—	I	1,47	?
27.12	<08.05	0,6	1,9	0,26	05.30	W35	M1,3	II	I	1,48	+26
27.12	10.05	1,0	3,2	0,25	07.30	W02	M1,9	II	G	1,48	-07
27.12	11.45	0,57	1,9	0,26	10.52	E12	C7,5	—	I	1,48	-22
1989 г.											
04.01	17.05	5,0	17	0,12	16.03	W60	M4,7	—	G	1,49	+28
13.01	10.05	>1,4	>4,8	0,15	08.29	W07	X2,3	II, IV	G	1,51	-04
18.01	19.05	0,9	3,2	0,26	18.04	W23	M9,6	II	G	1,52	+18
10.03	20.05	140	560	0,13	18.37	E22	X4,5	II	G	1,58	-03

мальной связи, $|\Delta\phi| > 60^\circ$ — далекие вспышки и промежуточный случай, когда $30^\circ < |\Delta\phi| \leq 60^\circ$. Из таблицы видно, что $\Delta t \sim 20$ — 60 мин в случае оптимальной связи и достигает 120 мин и более в случае далеких вспышек. Это естественно связать с увеличением времени распространения частиц в короне при увеличении $\Delta\phi$.

Следует отметить, что в отобранных событиях на фазе нарастания даже в случае больших Δt анизотропия протонов и α -частиц соответствовала их приходу от Солнца в интервале углов, близких к измеренному направлению ММП, т. е. указывала на солнечное происхождение частиц в событии.

На наш взгляд, наиболее существенным подтверждением надежности связи событий с солнечными вспышками является возможность аппроксимации временных профилей интенсивности электронов по простой диффузионной модели [14]. Проведенная аппроксимация временного хода потоков электронов для всех 46 событий показала, что на всех расстояниях присутствуют частицы, ускоренные во вспышке. Модель [14] хорошо работает при оптимальной связи точки наблюдения частиц с местом вспышки на Солнце. Тем не менее мы использовали ее и при $|\Delta\phi| > 30^\circ$. Полученные при этом длины свободного пробега $\lambda_{||}$, параллельные магнитной силовой линии, приведены в таблицах. Видно, что $\lambda_{||}$ для $|\Delta\phi| < 60^\circ$ лежит в интервале 0,08—0,3 а. е., что согласуется с измерениями и расчетами [15]. При $|\Delta\phi| > 60^\circ$ значения $\lambda_{||}$ в среднем ниже, чем при меньших $|\Delta\phi|$, что объясняется игнорированием процессов распространения в короне.

Таблица 2

Солнечные события в электронах на КА «Фобос-2» при $30^\circ < |\Delta\phi| < 60^\circ$

Дата события	Электроны, $E_e > 0,35$ МэВ				Вспышка					Геометрия	
	T_e , UT, час. мин	J_m	J_{mn}	λ_{ϕ} , а. е.	T_f , UT, час. мин	гелио- долгота	X_r	тип РИ	дли- тель- ность	r , а. е.	$\Delta\phi$, град

1988 г.

27.09	<08.25	0,1	0,53	0,088	06.34	W00	C4,7	II	I	1,19	-52
12.12	09.05	0,3	2,6	0,14	07.36	E12	C7,8	—	G	1,43	-50
14.12	09.45	0,1	0,92	0,10	08.42	E30	C7,4	—	I	1,44	-54
14.12	11.45	0,3	1,3	0,093	10.44	E16	C7,2	—	I	1,44	-40
14.12	21.45	4,0	13	0,14	20.35	E08	M1,0	—	I	1,44	-32
20.12	14.05	5,7	25	0,15	12.55	W60	M7,3	II	G	1,46	+38
22.12	08.05	0,43	5,3	0,27	06.17	W80	M1,0	—	G	1,46	+60
22.12	17.25	1,1	5,1	0,37	16.55	W61	M1,0	II	G	1,46	+41
28.12	12.45	1,4	7,3	0,24	12.18	W52	M2,2	—	I	1,48	+41
29.12	00.25	1,4	8,7	0,25	23.42	W58	M3,6	II	I	1,48	+46

1989 г.

07.02	16.05	0,3	1,4	0,19	14.43	E41	C9,0	—	I	1,53	-37
07.02	17.05	0,12	0,73	0,08	16.38	E45	M2,7	—	I	1,53	-41
06.03	<16.25	29	630	0,10	13.54	E69	X2,0	IV, II	G	1,57	-59
08.03	<10.05	8,6	110	0,27	08.26	E55	M5,7	—	G	1,58	-52
08.03	>20.05	8,6	75	0,32	18.50		M4,8	—	I	1,58	-48
09.03	04.25	4,3	36	0,13	02.39	E49	M1,8	II	I	1,58	-46
09.03	11.45	10	72	0,15	10.03	E42	M7,6	+	I	1,58	-39
09.03	16.25	43	240	0,15	15.15	E38	X4,0	—	G	1,58	-35
23.03	20.25	14	220	0,21	19.25	W28	X1,5	+	G	1,60	+60

4. Корреляция с проявлениями солнечной активности

В случае изотропной диффузии [14] интенсивность частиц данной энергии в максимуме события в данной точке пространства пропорциональна полному числу частиц с той же энергией в источнике и спектр частиц, построенный по максимальным потокам в каждом энергетическом интервале, отражает спектр инжекции. Однако для сравнения с условиями в источнике измеренные интенсивности должны быть нормализованы, т. е. приведены к одному и тому же расстоянию и азимутальному углу ϕ . В предположениях той же модели интенсивность в максимуме изменяется с расстоянием, как r^{-3} . Мы приводили максимальные потоки электронов к $r = 1$ а. е. Для нормализации по ϕ потоки электронов приводились в область оптимальной связи путем использования экспериментальной зависимости, полученной для электронов с энергией $\geq 0,5$ МэВ в работе [16]: J_m не зависит от ϕ при $|\Delta\phi| \leq 30^\circ$ и $J_m \propto \exp(-|\Delta\phi|/23^\circ)$ вне области оптимальной связи. Такая зависимость интенсивности частиц от углового расстояния ϕ (профиль инжекции) трактуется как результат комбинации двух процессов: корональной диффузии и потерь за счет выхода частиц на открытые магнитные силовые линии.

Данные о максимальных (измеренной J_m и нормированной J_{mn}) интенсивностях электронов приведены в таблицах. Мы просчитали коэффициенты корреляции

Солнечные события в электронах на КА «Фобос-2» при $|\Delta\phi| > 60^\circ$

Дата события	Электроны, $E_e > 0,35$ МэВ				Вспышка					Геометрия	
	T_e , UT, час. мин	J_m	J_{mn}	$\lambda_{ }$, а. е.	T_f , UT, час. мин	гелио- долгота	X_r	тип РИ	дли- тель- ность	r , а. е.	$\Delta\phi$, град
1988 г.											
27.09	<18.25	0,6	29	0,047	16.07	E65	M7,9	II	G	1,19	-110
28.09	23.45	0,23	10	0,10	22.32	E45	M5,6	II	G	1,20	-100
12.12	10.45	0,26	2,6	0,10	09.26	E35	C4,3		I	1,43	-73
13.12	03.05	0,43	3,1	0,14	01.55	E74	M2,0	II	I	1,43	-103
15.12	06.45	5,0	150	0,15	04.46	E59	X1,1	II, IV	G	1,45	-85
16.12	09.45	5,7	630	0,078	08.25	E37	X4,7	II, IV	G	1,45	-62
1989 г.											
03.02	16.05	0,26	9,6	0,12	14.06	W72	M3,0	II	G	1,52	+81
17.03	18.45	4,3	140	0,09	17.29	W60	X6,5	II, IV	G	1,59	+74
18.03	01.05	1,2	48	0,12	23.11	W64	M2,4	—	G	1,59	+78

R между $\lg J$ и $\lg X_r$, используя все 46 событий, и получили, что $R(\lg J_m, \lg X_r) = 0,77$ и $R(\lg J_{mn}, \lg X_r) = 0,84$ при $\Delta R \approx 0,05$. Видно, что в случае нормализованных потоков электронов корреляция несколько больше, а сами коэффициенты R достаточно высоки. При оптимизации диаграммы рассеяния $\lg J - \lg X_r$ получено, что $\lg J \propto A \lg X_r$, где $A = 0,9 \pm 0,1$ и $1,12 \pm 0,12$ соответственно для ненормализованных и нормализованных событий. Близкие значения R и A были получены для выборок событий, следующих после импульсных (I) и длительных (G) вспышек, а также после вспышек, сопровождавшихся радиоизлучением (РИ) типов II и IV. Все это означает, что максимальный поток электронов в событии линейно изменяется с амплитудой рентгеновского всплеска и подтверждает известный факт, что с увеличением реализуемой во вспышке энергии (X_r можно считать мерой этой энергии) растет поток ускоренных частиц, инжектируемых в межпланетное пространство как после импульсных, так и длительных вспышек.

Совокупность полученных данных свидетельствует о том, что электроны вспышечного происхождения являются существенной компонентой событий в частицах на расстояниях $r > 1$ а. е., и не подтверждает выводов о том, что после продолжительных вспышек, сопровождающихся ударными волнами, практически все энергичные частицы в межпланетном пространстве ускорены на ударных волнах.

Настоящая работа поддерживалась РФФИ (грант № 94-02-04453) и частично ISF (грант MQU 000).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mardsen R. G., Afonin V. V., Erdos G. et al. // Proc. 21st ICRC. Adelaide. 1990. V. 5. P. 121.
2. Mardsen R. G., Afonin V. V., Erdos G. et al. // Proc. 21st ICRC. Adelaide. 1990. V. 5. P. 481.
3. Witte M., Mardsen R. G., Afonin V. V. et al. // Proc. 21st ICRC. Adelaide. 1990. V. 5. P. 289.
4. Mardsen R. G., Wenzel K.-P., Afonin V. V. et al. // Planet. Space Sci. 1991. V. 39. № 11/2. P. 57.

5. *Cane H. V., Reames D. V., von Rosenunge T. T.*//J. Geophys. Res. 1988. V. 93. P. 9555.
6. *Cane H. V., Reames D. V., von Rosenunge T. T.*//Ap. J. Lett. 1991. V. 373. P. 675.
7. *Reames D. V.*//Ap. J. Lett. 1991. V. 373. P. 675.
8. *Mardsen R. G., Afonin V. V., Balazs A. et al.*//Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. A. 1990. V. 290. P. 211.
9. *Roatsch Th., Auster V., Mohlmann D. et al.* Phobos-2 FGMM data during cruise. Preprint 8/89. IKF Berlin. November, 1989.
10. *Lin R. P.*//Solar Phys. 1985. V. 100. P. 537.
11. *Kallenrode M.-B., Cliver E. W., Wibberenz G.*//Ap. J. 1992. V. 391. P. 370.
12. *Daibog E. I., Melnikov V. F., Stolpovskii V. G.*//Solar Phys. DMB. 1993. V. 144. P. 361.
13. *Notle J. T., Roelof E. C.*//Solar Phys. 1973. V. 33. P. 241.
14. *Lin R. P., Mewaldt R. A., van Hollebeke M. A. I.*//Ap. J. 1982. V. 253. P. 943.
15. *Palmer I. D.*//Rev. Geophys. Space Phys. 1982. V. 20. P. 335.
16. *Schellert G., Wibberenz G., Kunow H.*//Proc. 19th ICRC. La Jolla. 1985. V. 4. P. 305.

Научно-исследовательский институт
ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета

Центральный институт физических исследований
Венгерской академии наук, Будапешт

Институт космических исследований
Российской Академии наук