

МАТЕРИАЛЫ
XXXII ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО КОСМИЧЕСКИМ ЛУЧАМ
(Москва, июль 2012 г.)

Председатель Оргкомитета
XXXII Всероссийской конференции по космическим лучам
д-р физ.-мат. наук **М.И. Панасюк**

Материалы XXXII Всероссийской конференции по космическим лучам
под общей редакцией
д-ра физ.-мат. наук **Г.А. Базилевской**

УДК 524.1-352

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ УСКОРЕНИЯ ПРОТОНОВ, ОТВЕТСТВЕННЫХ ЗА НАЧАЛО НАЗЕМНЫХ ВОЗРАСТАНИЙ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

© 2013 г. В. Г. Курт¹, Б. Ю. Юшков¹, А. В. Белов², И. М. Черток², В. В. Гречнев³

E-mail: vvk@srd.sinp.msu.ru

Цель работы – определение времени ускорения на Солнце протонов, ответственных за начало наземных возрастаний солнечных космических лучей (СКЛ). По совокупности данных о временах максимальных значений производной мягкого рентгеновского излучения, интенсивностей жесткого рентгеновского и гамма-излучения, а также интенсивности радиовсплесков, измеренных в см/мм-диапазоне, был определен временной интервал максимального вспышечного энерговыделения для вспышек, связанных с 45 наземными возрастаниями СКЛ (№ 27–71). Для тех же событий было определено время начала наземных возрастаний. В 31 событии начало наземного возрастания запаздывало на 2–15 минут относительно измеренного максимума энерговыделения вспышки. Столь малые значения задержек могут означать, что эффективное ускорение протонов, ответственных по крайней мере за самое начало наземного возрастания, в большинстве событий происходило именно в интервале времени максимального энерговыделения вспышки.

DOI: 10.7868/S0367676513050347

ВВЕДЕНИЕ

Выяснение места и времени ускорения частиц, вызывающих наземные возрастания солнечных космических лучей (ground level enhancement – GLE), дает возможность выбора между двумя возможными сценариями ускорения этих частиц (при вспышечном пересоединении или на ударном фронте) в солнечных эруптивных вспышках.

Для решения этой задачи необходимо знать момент появления протонов субрелятивистских энергий на Солнце. Его можно определить по наблюдению гамма-излучения, возникающего при распаде нейтральных и заряженных пионов, которые рождаются при взаимодействии протонов с энергиями свыше 300 МэВ с веществом солнечной атмосферы [1, 2]. Такие измерения представляют собой прямой и единственный метод исследования временного поведения потоков ускоренных протонов [3], поскольку генерация гамма-излучения происходит практически мгновенно при взаимодействии этих протонов с плотным веществом. Однако таких экспериментов было совсем немного.

“Пионное” излучение было надежно выделено в спектре гамма-излучения в не более чем

15 вспышках (см., в частности, [4, 5]), а время начала и максимума этого излучения было зафиксировано лишь в 12 из них. Мы нашли, что гамма-излучение от распада пионов, как правило, появляется и достигает максимума вблизи момента максимального энерговыделения вспышки, который определялся по совокупности наблюдений в других диапазонах электромагнитного излучения [5]. Следовательно, эффективное ускорение протонов до субрелятивистских энергий, как правило, начинается во временном интервале, соответствующем наибольшему энерговыделению вспышки.

Измерения временного поведения “пионной” линии во вспышках, с которыми связаны наземные возрастания, могли бы прояснить связь между ускорением протонов на Солнце и возникновением GLE. Однако такие измерения были лишь в пяти событиях, связанных с GLE48 (24.05.1990), GLE51 (11.06.1991), GLE52 (15.06.1991), GLE65 (28.10.2003) и GLE69 (20.01.2005). Лишь в четырех из них было достоверно определено время начала и время максимума этого излучения. В событии 15.06.1991 измерения излучения от распада пионов начались спустя 20 минут после основного энерговыделения вспышки. Ранее мы показали [4], что первые частицы GLEs были зарегистрированы на Земле спустя 1–6 минут после начала “пионного” гамма-излучения. Этот результат означал, что выход первых частиц из окрестностей Солнца начался в этих событиях практически одновременно с их ускорением.

В настоящей работе мы сравнили времена ускорения протонов субрелятивистских энергий

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова РАН, Троицк.

³ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск.

на Солнце, определенные по максимуму вспышечного энерговыделения, и начала наземных возрастаний для 46 GLE (№ 25–71). Мы исследовали начальные моменты GLE, обусловленные приходом частиц, движущихся по кратчайшему пути, чтобы свести к минимуму эффекты распространения в межпланетном пространстве. Сравнение этих времен свидетельствует о том, что эффективное ускорение протонов во время эруптивных солнечных вспышек, как правило, начинается именно в интервале времени максимального энерговыделения.

МЕТОД АНАЛИЗА ДАННЫХ И ВЫВОДЫ

Мы проанализировали 46 событий, начиная с событий 1972 г. и кончая GLE № 71, по данным сети нейтронных мониторов, представленным в базе данных [6]. Для событий 21–22 солнечных циклов были дополнительно использованы данные [7–9, <http://www.nmdb.eu/nest/search.php>]. Из анализа были исключены данные НМ, обусловленные прямой регистрацией солнечных нейтронов. Для некоторых событий привлекались измерения потоков протонов с энергиями >500 МэВ на GOES/NEPAD.

Если возрастание на отдельном НМ превышало 4σ над фоновым уровнем, то это время считалось началом возрастания СКЛ T_{onset} аналогично [10]. При более слабом превышении над фоном на отдельном НМ использован метод наложения эпох для данных нескольких НМ, на которых наблюдается возрастание над фоном [5]. Точность определения T_{onset} зависит от величины возрастания, от временного разрешения НМ и от числа регистрирующих это событие НМ и составляет 1–5 минут.

Затем мы сравнили это время с временем максимума энерговыделения в каждой вспышке, определив его из совокупности данных о времени максимального значения производной мягкого рентгеновского излучения dI_{SXR}/dt и максимумов интенсивности жесткого рентгеновского и гамма-излучения в различных диапазонах длин волн. Мы использовали данные о жестком рентгеновском и гамма-излучениях, полученные в экспериментах на КА ВЕНЕРА-13, 14, ULYSSES, OSO-7, ПРОГНОЗ-2, SMM, GRANAT, YONKON, RHESSI, КОРОНАС-Ф, а также данные по узким гамма-линиям, измеренным в некоторых вспышках на ИСЗ OSO-7, ПРОГНОЗ-2, SMM, RHESSI, INTEGRAL. Использование данных детекторов КА ВЕНЕРА-13, 14 и ULYSSES позволило точно определить моменты энерговыделения для залимбовых вспышек. Эти линии излучаются ядрами, возбуждаемыми протонами с энергиями 10–50 МэВ. Также были использованы времена максимумов радиовсплесков в см/мм-диапазоне. Измеренные в различных

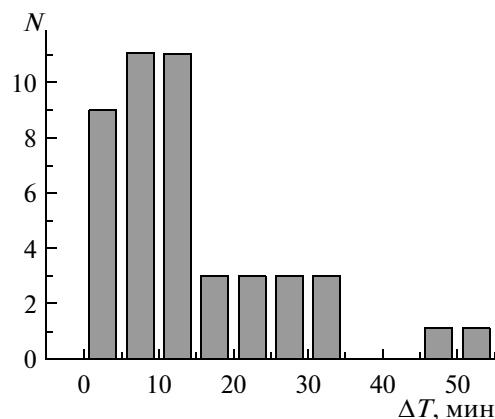


Рис. 1. Распределение числа GLE в зависимости от величины $\Delta T = T_{onset} - T_0$.

диапазонах излучения времена максимумов совпадают друг с другом и с максимумом dI_{SXR}/dt с точностью 2–4 мин. Усредненный момент времени принят за время максимального энерговыделения вспышки T_0 . Оценки этого времени по производной важны потому, что измерения GOES/SXR ведутся непрерывно, начиная с 1975 г., а временной ход dI_{SXR}/dt в целом отражает скорость внесения энергии ускоренными частицами во вспышечный объем (эффект Ньюперта [11]). Таким образом, временной ход dI_{SXR}/dt можно в первом приближении рассматривать как временной ход энерговыделения вспышки. Для четырех событий, во время которых было измерено “пионное” гамма-излучение, момент ускорения протонов был определен по этому излучению [4].

В таблице приведены полученные значения T_0 и T_{onset} и их разницы, а также время начала радиовсплесков II типа. На рис. 1 представлено распределение числа событий GLE в зависимости от величины $\Delta T = T_{onset} - T_0$. Для 31 события задержка между максимумом энерговыделения вспышки T_0 и началом GLE – T_{onset} не превышает 15 мин. Среднее время пролета частиц определяется длиной силовой линии в межпланетном магнитном поле (ММП), задаваемой средней скоростью солнечного ветра. Однако даже в невозмущенном ММП существует распределение длин силовых линий с максимумом, задаваемым этой средней скоростью солнечного ветра [12], поэтому некоторые силовые линии могут оказаться на 5–10% короче номинальной длины. Таким образом, длина пробега отдельно взятой частицы может быть меньше длины номинальной силовой линии ММП, но не менее расстояния от Солнца до Земли в данную эпоху. С учетом разброса скоростей минимальное время задержки прихода первых частиц относительно T_0 оценивается в 1–6 минут. Погрешности в определении T_0 и T_{onset} могут уве-

Основные характеристики событий

№ GLE	Дата	Координаты вспышки	Начало радио- всплеска II типа	T_0	T_{onset}	ΔT , мин
25	1972.08.07	N14W37	15:19	15:19–15:22	15:25–15:31	5–6
27	1976.04.30	S09W47	21:06	21:06–21:08	21:10–21:15	4–9
28	1977.09.19	N05W57	09:50 09:52	09:54–09:56	09:55–10:00	1–6
29	1977.09.24	N10W116	05:55.0	05:55	06:05–06:10	5–10
30	1977.11.22	N24W38	10:01.9	10:00–10:01	10:00–10:05	2–4
31	1978.05.07	N22W68	03:27.0	03:27–03:30	03:30–03:35	1–7
32	1978.09.23	N35W50	09:58	10:05	10:25–10:30	18–32
33	1979.08.21	N15W38	06:15	06:13–06:17	06:15–06:20	2–7
34	1981.04.10	N07W35	16:49.1	16:48–16:49	17:00–17:05	13–18
35	1981.05.10	N03W75	07:18.9	07:19–07:20	07:45–07:50	15–30
36	1981.10.12	S18E30	06:27.0	06:27–06:29	06:50–06:55	24
37	1982.11.26	S11W87	02:34.0	02:39–02:40	02:50–02:55	5–15
38	1982.12.07	S19W82	23:44.0	23:44–23:45	23:45–23:50	1–5
39	1984.02.16	S16W94	08:58	08:58	8:50–8:55	<0
40	1989.07.25	N25W84	08:40.9	08:41–8:42	08:40–08:45	1–4
41	1989.08.16	S18W84	01:03.0	01:13–01:14	01:15–01:20	2–6
42	1989.09.29	S26W100	11:25.7	11:26	11:25–11:30	2–4
43	1989.10.19	S27E10	12:49.0	12:53–12:56	13:00–13:02	6–8
44	1989.10.22	S27W31	17:45.0	17:45–17:48	17:48–17:50	3–5
45	1989.10.24	S30W57	18:06	18:10–18:18	18:20–18:25	5–10
46	1989.11.15	N11W26	06:57.0	06:56–06:57	07:00–07:05	3–4
47	1990.05.21	N35W36	>22:14	22:14–22:15	22:20–20:25	6–11
48	1990.05.24	N33W78	21:00.0	20:48.4	20:48–20:50	1 ± 0.5
49	1990.05.26	N33W104	>20:48	20:49–20:51	20:55–21:00	4–10
50	1990.05.28	N33W120	04:30.0	04:30–04:31	05:00–05:05	4–6
51	1991.06.11	N31W17	02:05	02:12:56	2:16–2:18	4 ± 1
52	1991.06.15	N33W69	08:14.2	08:14–08:15	08:20–08:21	5.5 ± 0.5
53	1992.06.25	N09W67	19:57.0	20:02–20:04	20:00–20:05	1–3
54	1992.11.02	S25W100	02:53.0	02:54–02:57	03:10–03:15	15–25
55	1997.11.06	S18W63	11:53.2	11:53–11:54	11:58–12:00	4–7
56	1998.05.02	S15W15	13:29:42	13:42–13:43	13:55–14:00	12–18
57	1998.05.06	S11W65	08:03.3	08:05–08:06	08:05–08:10	2–6
58	1998.08.24	N35E09	22:02.0	22:03–22:05	22:15–22:20	12–16
59	2000.07.14	N22W07	10:20.0	10:19–10:20	10:22–10:23	4 ± 1
60	2001.04.15	S20W85	13:48.0	13:46–13:49	13:51–13:52	3–4
61	2001.04.18	S20W115	02:17.0	02:14	02:35–02:40	20–25
62	2001.11.04	N06W18	16:10	16:13	16:25–16:30	12–16
63	2001.12.26	N08W54	05:12	05:15–05:17	05:21–05:22	4–6
64	2002.08.24	S02W81	01:01.0	01:01–01:02	01:00–01:05	2–4
65	2003.10.28	S16E08	11:02	11:04:30	11:09–11:10	4 ± 0.5
66	2003.10.29	S15W02	20:42:00	20:44:25	20:59–21:00	16
67	2003.11.02	S14W56	17:14.0	17:16–17:18	17:15–17:20	3–5
68	2005.01.17	N15W25	09:44:00	09:43.5	10:30–10:35	50
69	2005.01.20	N14W61	06:35.7	06:45:30	06:47–06:48	2 ± 0.5
70	2006.12.13	S06W23	02:18.7	02:26–02:28	02:35–02:40	6–14
71	2012.05.17	N12W89	01:31	01:35	01:35–01:36	1–2

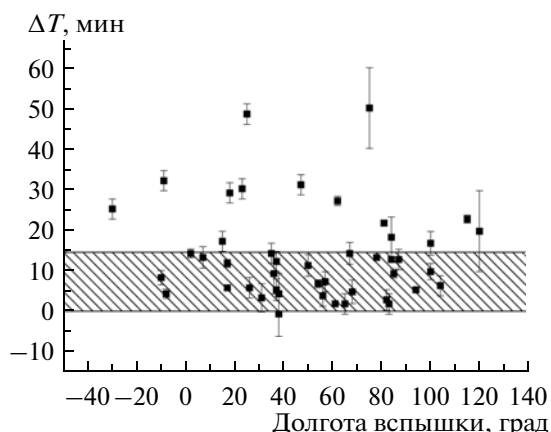


Рис. 2. Величина задержки отдельных событий в зависимости от гелиодолготы “родительской” вспышки.

личить наблюдаемые минимальные задержки до 10–14 мин, что и видно на рис. 1. На рис. 2 представлено распределение задержек в зависимости от гелиодолготы вспышки. В отличие от [13], значимая зависимость задержки от долготы не была обнаружена.

Предложенный в данной работе способ определения момента ускорения энергичных протонов по максимальному энерговыделению вспышки дает унифицированный репер для начала отсчета времени при исследовании GLE. Использование времени начала наземных возрастаний позволяет свети к минимуму эффекты распространения частиц в межпланетном пространстве. Другие методы, применяющиеся для этой цели (анализ данных по мягкому и жесткому рентгеновскому излучению, определение момента появления радиоизлучения II типа, расчет времени выхода частиц из Солнца по времени регистрации частиц разных энергий [8, 13–15]) зачастую дают противоречивые результаты.

Сравнение времен максимального энерговыделения вспышки T_0 и начала радиовсплеска II типа (см. рис. 3) показывает, что в 25 случаях эти времена различаются менее чем на 4 мин. Это обстоятельство не позволяет сделать выбор в пользу ускорения протонов во вспышке или на ударном фронте. Тем не менее, полученное распределение числа событий по величине задержки между временем максимального энерговыделения и временем прихода первых частиц на 1 а.е. является весомым аргументом в пользу того, что в большинстве событий ускорение протонов до релятивистских энергий и последующий их выход в межпланетное пространство начинаются в момент максимального энерговыделения вспышки, а не позже.

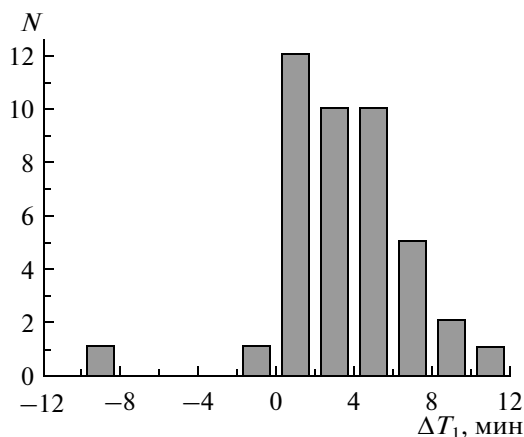


Рис. 3. Распределение числа GLE в зависимости от величины $\Delta T_1 = T_{II\text{type}} - T_0$, где $T_{II\text{type}}$ – время начала радиовсплеска II типа.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 09-02-00115, 09-02-011-45, 11-02-00757, 12-02-00037), программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 22, интеграционного проекта СО РАН № 4, гранта Минобрнауки РФ по госконтракту 16.518.11.7065.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ramaty R., Murphy R.J. // Space Sci. Rev. 1987. V. 45. P. 213.
2. Murphy R.J., Dermer C.D., Ramaty R. // Astrophys. J. Suppl. 1987. V. 63. P. 721.
3. Кузнецов С.Н., Курт В.Г., Юшков Б.Ю., Кудела К. // Изв. РАН. Сер. физ. 2006. Т. 70. С. 1457; Kuznetsov S.N., Kurt V.G., Yushkov B.Yu., Kudela K. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics. 2006. V. 70. № 10. P. 1665.
4. Курт В.Г., Юшков Б.Ю., Белов А.В. // Письма в “Астрон. журнал”. 2010. Т. 36. С. 550.
5. Kurt V., Kudela K., Yushkov B., Galkin V. // Adv. Astron. V. 2013. Article ID 690921. 2013.
6. Белов А.В., Ерошенко Е.А., Крякунова О.Н., Курт В.Г., Янке В.Г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2010. Т. 50. С. 23.
7. Cliver E.W., Kahler S.W., Shea M.A., Smart D.F. // Astrophys. J. 1982. V. 260. P. 362.
8. Shea M.A., Smart D.F., Gentile L.G., Campbell J.M. // Proc. 24th ICRC. Rome. 1995. V. 4. P. 244.
9. Kudela K., Shea M.A., Smart D.F., Gentile L.G. // Proc. 23rd ICRC. Calgary. 1993. V. 3. P. 71.
10. McCracken K.G., Moraal H. // Proc. 30th ICRC. Merida. 2008. V. 1. P. 269.
11. Neupert W.M. // Astrophys. J. 1968. V. 153. L59.
12. Pei C., Jokipii J.R., Giacalone J. // Astrophys. J. 2006. V. 641. P. 1222.
13. Reames D.V. // Astrophys. J., 2009, V.693, P.812.
14. Bazilevskaya G.A. // Adv. Space Res. 2009. V. 43. P. 530.
15. Aschwanden M.J. // Space Sci. Rev. 2012. V. 171. P. 3.