

УДК 537.591.5

СОЛНЕЧНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ: 70 ЛЕТ НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2013 г. Л. И. Мирошниченко^{1,2}, Э. В. Вашенюк³, Х. А. Перес-Пераса⁴

¹Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова (ИЗМИРАН), г. Троицк, г. Москва

²НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

³Полярный Геофизический институт, г. Апатиты, Мурманская обл.

⁴Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, C. U., Coyoacán, 04510, México

e-mail: leonty@izmiran.ru

Поступила в редакцию 07.03.2012 г.

После доработки 05.03.2013 г.

Суммированы основные данные и обобщены результаты, полученные по данным мировой сети станций за весь период наземных наблюдений солнечных космических лучей (СКЛ), начиная с момента их открытия 28 февраля 1942 г. Описаны методы и аппаратура для регистрации СКЛ, обсуждены физические, методические и прикладные аспекты, связанные с генерацией СКЛ, их взаимодействие с атмосферой Солнца, перенос в межпланетном магнитном поле, движение в магнитосфере Земли и воздействие на земную атмосферу. Показано, что в этой области космофизики за 70 лет исследований получены результаты, имеющие фундаментальное значение. Особое внимание уделено современным моделям и концепциям GLE (Ground Level Enhancement). Намечены наиболее перспективные направления развития и применения этого эффективного метода солнечно-земной физики.

DOI: 10.7868/S001679401305012X

1. ВВЕДЕНИЕ

Ускоренные солнечные частицы, с исторически возникшим и давно устоявшимся названием “солнечные космические лучи” (СКЛ), изучаются различными методами уже ~70 лет. За это время был опубликован ряд обстоятельных обзоров и монографий: [Elliot, 1952; Dorman, 1958; Carmichael, 1962; Дорман и Мирошниченко, 1968; Sakura, 1974; Pomerantz and Duggal, 1974; Duggal, 1979; Dorman and Venkatesan, 1993; Reames, 1999; Ryan et al., 2000; Miroshnichenko, 2001; Miroshnichenko and Perez-Peraza, 2008]. В рамках более общей проблемы вариаций космических лучей (КЛ) проблему СКЛ детально рассматривал Дорман [1957, 1963]. Впоследствии различные методические, экспериментальные и общезначимые аспекты изучения СКЛ, особенности их взаимодействия с атмосферой Солнца, геофизические эффекты СКЛ, их возможный вклад в проблему солнечно-земных связей, а также некоторые прикладные аспекты в их современном понимании были описаны в монографиях [Miroshnichenko, 2001, 2003; Мирошниченко, 2011]. На рубеже 1990-ых годов [Simpson, 1990; Cliver, 2009] за наземными возрастаниями СКЛ закрепилось международное название GLE (Ground Level Enhancement или Ground Level Event). Совсем недавно в специальном выпуске журнала Space Sci-

ence Reviews (V. 171, 2012) была опубликована подборка из 7-ми статей зарубежных авторов по различным аспектам исследования GLE. Такой интерес к проблеме, несомненно, отражает ее фундаментальный характер.

Вместе с тем, последний обзор по СКЛ на русском языке был опубликован более 20-ти лет назад [Мирошниченко, 1992]. Поэтому предлагаемый новый обзор и цитируемая литература рассчитаны, прежде всего, на русскоязычного читателя. Сначала мы описываем поучительную историю проблемы (Раздел 2), аппаратуру для регистрации и основные результаты наземных наблюдений СКЛ за 70 лет (Раздел 3). В Разделе 4 кратко описана современная методика анализа GLE, сделана попытка обосновать новую концепцию этого явления. Далее обсуждаются фундаментальные физические аспекты – максимальная энергия СКЛ (Раздел 5); их связь с СМЕ (корональными выбросами вещества), частота регистрации GLE (Раздел 6); приводятся некоторые результаты по геофизическим эффектам СКЛ, отмечается возможность использования наземных данных для прогноза радиационной опасности в космосе (Раздел 7). В Разделе 8 рассматриваются перспективы изучения СКЛ/GLE.

2. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ПРОБЛЕМЫ

В истории науки не так уж часто бывают случаи, когда рождению нового направления можно сопоставить конкретную дату. Но именно такой случай имел место для СКЛ: 28 февраля 1942 г. наземными детекторами был впервые зарегистрирован приход к Земле ускоренных протонов от Солнца. 7 марта 1942 г. было зарегистрировано новое аналогичное событие [Lange and Forbush, 1942]. Так состоялось одно из крупнейших астрофизических открытий XX века: оказалось, что в космических условиях заряженные частицы могут ускоряться до высоких энергий. Правда, осознание этого фундаментального факта и его тесной связи с солнечными вспышками пришло не сразу. Лишь после регистрации третьего подобного события 25 июля 1946 г. автор открытия [Forbush, 1946] осторожно написал, что эти наблюдения "...позволяют сделать довольно неожиданный вывод, что все три необычных возрастания интенсивности КЛ можно объяснить потоками заряженных частиц, испущенных Солнцем". После четвертого наземного возрастания СКЛ 19 ноября 1949 г. [Adams, 1950; Forbush et al., 1950; Красильников и др., 1955] связь наблюдаемых релятивистских частиц со вспышками на Солнце стала неоспоримым фактом, положившим начало новой респектабельной научной концепции.

С февраля 1942 г. по декабрь 2006 г. было зарегистрировано 70 GLE [Miroshnichenko and Perez-Perez, 2008]. Для удобства исследователей все события, начиная с 28 февраля 1942 г. (GLE01), получили порядковые номера. Последнее событие 23-го цикла солнечной активности (СА) наблюдалось 13 декабря 2006 г. (GLE70). Протонная активность Солнца в 24-ом цикле (начало — январь 2009 г.) возобновилась не сразу: первое GLE нового цикла произошло лишь 17 мая 2012 г. (GLE71). Эта пауза, по-видимому, не только отражает особые свойства 23-го цикла СА (в частности, его сильно растянутый период минимума), но и говорит о необычном характере 24-го цикла, который является, скорее всего, переломным в ходе активности Солнца за последние 150–200 лет.

В том же 1942 г. (26–28 февраля) британские радарные станции впервые регистрировали интенсивные радиошумы в диапазоне метровых волн (4–6 м) из направления на Солнце [Chupp, 1996]. Как выяснилось позже, это излучение, обусловленное ускоренными электронами, было связано с прохождением через центральный меридиан Солнца (ЦМС) активной области (АО). По-видимому, именно в ней 28 февраля 1942 г. произошла мощная вспышка балла 3+ с координатами 07° N, 04° E [Pomerantz and Duggal, 1974; Duggal, 1979]. Таким образом, в феврале 1942 г., кроме открытия СКЛ, состоялось другое важное событие в истории изучения Солнца — родилась

солнечная радиоастрономия, о чем стало известно только в 1946 г. [Neu, 1946].

В 1940-ых годах наблюдения и данные о проявлениях СА (например, в виде помех для радиотехнических средств обнаружения и слежения) были скрыты плотной завесой секретности между противоборствующими сторонами во второй мировой войне [Smart and Shea, 1989]. Более того, изучение КЛ в те годы относилось исключительно к ядерной физике, а результаты были также частично (США) или полностью (Германия, СССР) засекречены в связи с разработкой ядерного оружия [Кривоносов, 2000; Губарев, 2004]. Отметим, что между 1941 и 1943 гг. различными группами в Европе и Америке наблюдались и другие возрастания интенсивности КЛ, напомиавшие эффекты от солнечных вспышек [Chupp, 1996]. Но лишь после наземных событий 1946 и 1949 гг. гипотеза о солнечном происхождении подобных эффектов стала признанной научной истиной. Это стало первым существенным результатом в данной области — было открыто ускорение протонов в космических условиях (в атмосферах звезд), еще до того, как в 1953 г. в Крабовидной туманности открыли синхротронное (магнитотормозное) радиоизлучение, которое свидетельствовало об аналогичных процессах ускорения электронов в Галактике (например, при вспышках Сверхновых звезд). Важно подчеркнуть, что изучение СКЛ началось именно с анализа данных наземных наблюдений, спустя почти 30 лет после исторического открытия В. Гессом галактических космических лучей (ГКЛ) в августе 1912 г.

3. МИРОВАЯ СЕТЬ СТАНЦИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Наземные наблюдения вторичных компонент (в основном мюонов и нейтронов) до сих пор остаются самым надежным источником данных о первичных релятивистских СКЛ. Исторически первыми детекторами для регистрации GLE были ионизационные камеры (ИК) и мюонные телескопы (МТ), а с середины 1950-ых годов — нейтронные мониторы (НМ). При регистрации СКЛ эти стандартные детекторы на уровне моря имеют эффективные энергии ~25–35; 15–20 и 4–6 ГэВ соответственно [Miroshnichenko, 2001]. Нейтронные детекторы для регистрации GLE были впервые использованы во время события 19 ноября 1949 г. [Adams, 1950]. Одной из важных характеристик станции КЛ является жесткость геомагнитного обрезания частиц R_c при их движении в магнитосфере Земли.

3.1. Мировая сеть станций

Мировая сеть НМ была создана более 50-ти лет назад на основе НМ типа МГГ. Системы сбора

и анализа данных постоянно совершенствовались, и в начале 1960-ых годов была создана новая его модификация — нейтронный супермонитор СНМ-64 [Carmichael, 1968]. Статистическая точность такого прибора за один час регистрации составляет 0.246% на широте Апатит (67.57° N, 33.4° E, 181 м над у.м., $R_c = 0.65$ ГВ) в минимуме солнечной активности, когда интенсивность ГКЛ максимальна. Для ст. Апатиты это примерно втрое выше, чем точность регистрации НМ типа МГГ (0.81%). Для Москвы (55.47° N, 37.32° E, 200 м над у.м., $R_c = 2.44$ ГВ) эта величина составляет ~0.18%, а на широте Мехико (2274 м над у.м., 99.2° W, 19.33° N, $R_c = 8.2$ ГВ) она близка к 0.36%. Точность регистрации зависит от высоты станции над уровнем моря, ее широты (точнее — от R_c), а также от числа счетчиков СНМ-64 в детекторе, которое не всегда стандартно. Высокая точность позволяет измерять “тонкую структуру” временных профилей потоков СКЛ (с разрешением до 1 мин и даже до 10 с), а затем строить более точные модели их ускорения, испускания и распространения.

В настоящее время мировая сеть для непрерывной регистрации КЛ насчитывает ~50 станций, оборудованных в основном супермониторами СНМ-64; их данные образуют международную базу MNDB. Существуют наземные МТ различной конструкции, которые позволяют регистрировать СКЛ, приходящие под большими углами к вертикали. Имеются также несколько подземных МТ, полезных для регистрации экстремальных событий типа 29 сентября 1989 г. (GLE42) [Крымский и др., 1990; Swinson and Shea, 1990; Miroshnichenko et al., 2000]. Нередко GLE дают всплески интенсивности вторичных мюонов на нестандартных установках, созданных для решения астрофизических задач и изучения ядерно-физических эффектов ГКЛ [Karpov et al., 1998]. Эти наблюдения удачно дополняются сетью солнечных нейтронных телескопов (СНТ) [Flückiger et al., 1998], которые регистрируют приход вторичных нейтронов, рожденных в атмосфере Солнца первичными ускоренными ионами.

Данные мировой сети станций позволяют оценивать максимальную энергию СКЛ E_m (или магнитную жесткость частицы R_m) фактически на уровне верхнего предела жесткости геомагнитного обрезания R_c (т.е. вблизи $R_c = 17$ ГВ на геомагнитном экваторе). Так, для гигантского события 23 февраля 1956 г. (GLE05) по данным стандартных детекторов была получена оценка $R_m = 20.0(+10, -4)$ ГВ. Если же использовать данные нестандартных детекторов, то появляется возможность продвинуться [Мирошниченко, 1994] в область энергий значительно выше 20 ГэВ. Например, в том же событии GLE05 наклонными мюонными телескопами в Индии удалось зарегистрировать релятивистские солнечные протоны с энергиями в интервале 35–

67.6 ГэВ. Наблюдения с помощью подземных детекторов, ориентированных в сторону Солнца, указывают на возможность ускорения солнечных протонов до энергий ~100–200 ГэВ [Schindler and Kearney, 1973] и даже до $E_p \geq 500$ ГэВ [Karpov et al., 1998]. Последняя возможность, однако, все еще остается под сомнением.

3.2. Статистика GLE

Первые события GLE (до 1956 г.) регистрировались малым числом станций, которые были оборудованы ИК и МТ; эти приборы были предназначены в основном для измерений одной жесткой (мюонной) компоненты. Из-за меньшей эффективной энергии регистрации НМ, по сравнению с МТ и ИК, оказываются более чувствительными к СКЛ. В настоящее время для идентификации GLE применяется специальная методика [Shea and Smart, 1982; Humble et al., 1991; Cramp et al., 1997; Vashenyuk et al., 2009a, b], которая учитывает анизотропию прихода потока СКЛ к Земле, их круто падающий энергетический спектр и высокую чувствительность НМ. Вместе с тем, известно, что некоторые слабые GLE (~1–10%) отмечались только на высокоширотных или полярных станциях. Примечательно, что последнее событие 23-го цикла — GLE70 (13 декабря 2006 г.) было зарегистрировано не только мировой сетью НМ, но и нестандартными наземными детекторами, в частности, мюонным годоскопом УРАГАН [Timashkov et al., 2007]. Более того, это GLE регистрировалось также детектором широких атмосферных ливней (ШАЛ) IceTop, который является частью нейтринного телескопа IceCube в Антарктиде [Abbasi et al., 2008]. Сводка всех GLEs, зарегистрированных за период 1942–2012 гг., приведена в табл. 1.

Исходя из табл. 1, можно предполагать, что в ранние годы наблюдений, по техническим и методическим причинам, некоторые слабые GLE не были зарегистрированы. При их средней частоте $\eta \sim 1.0$ год⁻¹, число пропущенных событий за 1942–1956 гг. могло быть значительным [Мирошниченко и др., 2012]. Сильно затянувшийся минимум 23-его цикла СА завершился в декабре 2008 г., однако развитие 24-го цикла СА (начало — январь 2009 г.) идет очень медленно (вяло), образование пятен, вспышечная и “протонная” активность Солнца в целом находятся на довольно низком уровне. Так, за 4.5 года цикла пока (июль 2013 г.) произошло всего одно GLE.

3.3. Спектр СКЛ у Земли

В целях моделирования “наихудшего случая” с точки зрения радиационной опасности в космосе [Smart and Shea, 1989; Miroshnichenko, 2003], автор [Мирошниченко, 1994] обобщил данные о солнечных протонных событиях (СПС), которые

Таблица 1. Основные характеристики наземных возрастных СКЛ за период 1942–2012 гг.

Номер GLE	Дата регистрации	Положение вспышки	Начало UT	Балл $N\alpha/X$	Номер GLE	Дата регистрации	Положение вспышки	Начало UT	Балл $N\alpha/X$
1	28.02.1942	07N 04E	12:28	3+	37	26.11.1982	12S 87W	02:30	2B/X4
2	07.03.1942	07N 90W	N.O.	–/–	38	07.12.1982	19S 86W	23:41	1B/X2.8
3	25.07.1946	22N 15E	16:15	3+	39	16.02.1984	–S ~130W	<08:58	–/–
4	19.11.1949	03S 72W	10:29	3+	40	25.07.1989	26N 85W	08:39	2N/X2
5	23.02.1956	23N 80W	<03:34	3	41	16.08.1989	15S 85W	00:58	2N/12.5
6	31.08.1956	15N 15E	12:26	3	42	29.09.1989	24S ~105W	11:41	1B/X9
7	17.07.1959	16N 31W	21:14	3+	43	19.10.1989	25S 09E	12:29	3B/X13
8	04.05.1960	13N 90W	10:00	3	44	22.10.1989	27S 32W	17:08	1N/X2.9
9	03.09.1960	18N 88E	00:37	2+	45	24.10.1989	29S 57W	17:38	2N/X5.7
10	12.11.1960	27N 04W	13:15	3+	46	15.11.1989	11N 28W	06:38	2B/X3.2
11	15.01.1960	25N 35W	02:07	3+	47	21.05.1990	34N 37W	22:12	2B/X5.5
12	20.11.1960	28N ~112W	20:17	2	48	24.05.1990	36N 76W	20:46	1B/X9.3
13	18.07.1961	07S 59W	09:20	3+	49	26.05.1990	~35N,103W	20:45	–/–
14	20.07.1961	06S 90W	15:53	3	50	28.05.1990	~35N120W	<05:16	–/–
15	07.07.1966	35N 48W	00:25	2B	51	11.06.1991	32N 15W	01:05	2B/X12
16	28.01.1967	22N ~150W	<02:00	–/–	52	15.06.1991	36N 70W	06:33	3B/X12
17	28.01.1967	22N ~150W	<08:00	–/–	53	25.06.1992	09N 69W	19:47	1B/M1.4
18	29.09.1968	17N 51W	16:17	2B	54	02.11.1992	~25S~100W	02:31	–/X9
19	18.11.1968	21N 87W	<10:26	1B	55	06.11.1997	18S 68W	11:49	2B/X9.4
20	25.02.1969	13N 37W	09:00	2B/X2	56	02.05.1998	15S 15W	13:34	3B/X1.1
21	30.03.1969	19N 103W	<03:32	1N	57	06.05.1998	11S 65W	07:58	1N/X2.7
22	24.01.1970	18N 49W	22:15	3B/X5	58	24.08.1998	18N 09E	21:48	3B/M7.1
23	01.09.1971	11S 120W	<19:34	–/–	59	14.07.2000	22N 07W	10:03	3B/X5.7
24	04.08.1972	14N 08E	06:17	3B/X4	60	15.04.2001	20S 85W	13:19	2B/X14.4
25	07.08.1972	14N 37W	14:49	3B/X4	61	18.04.2001	23S 117W	02:11	–/–
26	29.04.1973	14N 73W	20:56	2B/X1	62	04.11.2001	06N 18W	16:03	3B/1.3
27	30.04.1976	08S 46W	20:47	2B/X2	63	26.12.2001	08N 54W	04:32	–/M7.1
28	19.09.1977	08N 57W	<09:55	3B/X2	64	24.08.2002	02S 81W	00:49	–/X3.1
29	24.09.1977	10N 120W	<05:52	–/–	65	28.10.2003	16S 08E	11:00	4B/X17.2
30	22.11.1977	24N 40W	09:45	2B/X1	66	29.10.2003	19S 09W	20:37	–/X10
31	07.05.1978	23N 72W	03:27	1N/X2	67	02.11.2003	18S 59W	17:18	2B/X8.3
32	23.09.1978	35N 50W	09:44	3B/X1	68	17.01.2005	15N 25W	06:59	3B/X3.8
33	21.08.1979	17N 40W	05:50	2B/C6	69	20.01.2005	14N 61W	06:39	2B/X7.1
34	10.04.1981	07N 36W	16:32	2B/X2.3	70	13.12.2006	06S 23W	02:17	4B/X3.4
35	10.05.1981	03N 75W	07:15	1N/M1	71	17.05.2012	07N 88 W	01:25	1F/M5.1
36	12.10.1981	18S 31E	06:15	2B/X3.1					

отличались наибольшей интенсивностью частиц вблизи орбиты Земли. В их число попали также события GLE, зарегистрированные в феврале 1956 г. (GLE05), в ноябре 1960 г., августе 1972 г., сентябре–октябре 1989 г. Обобщение данных позволило построить “предельный” интегральный спектр СКЛ в широком интервале энергий, по крайней мере, между $E_p \geq 1$ МэВ и $E_p \geq 10$ ГэВ.

Спектр строился по максимальным значениям интенсивности протонов $I_p(t_m)$ в момент максимума возрастания t_m у Земли (так называемый “time-of-maximum-method” [Miroshnichenko and Perez-Peraza, 2008]). Его можно аппроксимировать степенной функцией с показателем, зависящим от энергии протонов, а именно: $\gamma = \gamma_0 E^\alpha$, где

Таблица 2. Параметры предельного спектра СКЛ

E_p , эВ	$>10^6$	$>10^7$	$>10^8$	$>10^9$	$>10^{10}$	$>10^{11}$
Индекс γ	1.0	1.45	1.65	2.2	3.6	>4.0
$I(>E_p)$, pfu	10^7	10^6	3.5×10^4	8×10^2	1.2×10^0	7×10^{-4}

$a = 1.0$ при $E_p \geq 1$ МэВ. Основные параметры предельного спектра приведены в табл. 2, где значения интенсивности приведены в стандартных единицах pfu ($1\ pfu = 1\ \text{см}^{-2}\ \text{с}^{-1}\ \text{ср}^{-1}$).

Предельный спектр был построен таким образом, чтобы перекрыть ошибки измерений и возможные методические неопределенности при восстановлении спектра по наземным наблюдениям. С этой целью все точки спектра на графике [Мирошниченко, 1994] были “приподняты” примерно на порядок величины относительно самых больших измеренных (оцененных) значений $I(>E_p)$ для каждого из энергетических порогов в табл. 2. Множитель ~ 10 был выбран так, чтобы перекрыть установленные (предполагаемые) неопределенности в значениях $I_p(t_m)$. Недавно по содержанию нитратов в кернах Гренландского льда [McCracken et al., 2001] удалось определить флюенс протонов с энергией ≥ 30 МэВ для гигантского события 1–2 сентября 1859 г. Как показал наш анализ [Miroshnichenko and Nymmik, 2013], с точностью до множителя ~ 7 эти данные подтверждают концепцию предельного спектра.

Кроме приложений к проблеме радиационной безопасности, предельный интегральный спектр образует опорный интервал потоков СКЛ для решения фундаментальной физической задачи – оценки максимальных возможностей ускорителя (ускорителей) частиц на Солнце или вблизи него. Эта цель пока не достигнута. Вместе с тем, определено подтверждена тенденция спектра к изменению наклона (“завалу”) в области высоких энергий. В целом, однако, данных в области предельно высоких энергий оказалось пока недостаточно, чтобы определить значение E_m для протонов СКЛ. Этот вопрос остается без определенного ответа до сих пор, даже при статистике, возросшей до 71 GLE (табл. 1).

Спектры для событий последнего цикла SA были суммированы в работе [Wang, 2009]. После выдающегося релятивистского события GLE42 (29 сентября 1989 г.) их список пополнился очень большим событием 20 января 2005 г. (GLE69), которое было зарегистрировано в основном нейтронными мониторами. На стандартных МТ, по-видимому, не было зафиксировано никакого возрастания, хотя некоторые нестандартные мюонные детекторы зарегистрировали статистически значимые эффекты. Более того, в связи с этим GLE пришлось пересмотреть всю их “иерархию” по мак-

симальной величине возрастания при релятивистских энергиях [Miroshnichenko and Perez-Peraza, 2008]. Теперь их распределение “по рангу” выглядит так, как показано в табл. 3 (N.O. означает отсутствие наблюдений). Событие GLE69 по данным НМ заняло в списке вторую строчку; GLE04 (19 ноября 1949 г., данные НМ и мюонных детекторов) оттеснено на третье место, а GLE42 с очень жестким спектром занимает всего лишь четвертую строчку. Однако выдающееся GLE05 по-прежнему остается событием ранга 1.

Заметим, что “иерархия” СПС сильно зависит от ключевого параметра классификации (интервал энергий/жесткостей, форма спектра, интенсивность, флюенс и т.п.). Так, большой поток частиц релятивистской энергии еще не означает, что в нерелятивистской области также будет наблюдаться мощный поток протонов. Аналогично, обильный поток нерелятивистских частиц не может служить однозначным признаком большого потока релятивистских СКЛ. Эта особенность спектров создает большие трудности как при моделировании механизмов ускорения СКЛ [Miroshnichenko and Perez-Peraza, 2008], так и при построении моделей и разработке методик для прогнозирования радиационной опасности [Miroshnichenko, 2003].

4. МЕТОДИКА АНАЛИЗА GLE

Для определения характеристик СКЛ за пределами атмосферы Земли необходимо вычислять коэффициенты, определяющие связь потока первичных КЛ, падающих на границу атмосферы, с откликом, выраженным в скорости счета прибора, например, НМ. В качестве коэффициентов связи многие исследователи используют так называемые

Таблица 3. Амплитуда событий GLE (в %) в солнечных циклах 17–23

Ранг	Дата/Детектор	ИК	МТ	НМ
1	23.02.1956	300	280	4554 (15-мин)
2	20.01.2005	N.O.	13	4527.4 (1-мин)
3	19.11.1949	41	70	563
4	29.09.1989	N.O.	41	373
5	25.07.1946	20	N.O.	N.O.
6	28.02.1942	15	N.O.	N.O.
7	07.03.1942	14	N.O.	N.O.

ую удельную функцию сбора НМ [Debrunner et al., 1984], которая с приемлемой точностью покрывает диапазон жесткостей от ~ 1 ГВ до ≥ 20 ГВ. В этой связи важно отметить, что спектр СКЛ обычно намного круче (мягче), чем спектр ГКЛ. Это отличие оказалось очень полезным для определения спектра СКЛ во время больших GLE, поскольку наложение двух потоков КЛ – галактического и солнечного происхождения – приводит к существенному изменению свойств вторичных компонент.

Это проявляется, прежде всего, в изменении пробега для поглощения вторичных компонент в нижней части атмосферы, т.е. в изменении барометрического коэффициента β , что особенно важно для нейтронной компоненты. Величину, обратную барометрическому коэффициенту $\lambda = 1/\beta$, называют длиной поглощения в атмосфере (это пробег, на котором поток частиц уменьшается в e раз). Процедура учета барометрического эффекта при наличии двух компонент (галактической и солнечной) с различными пробегами для поглощения λ_g и λ_s соответственно, была разработана более 50-ти лет назад [McCracken, 1962] и в дальнейшем развита в работах [Wilson et al., 1967; Каминер, 1967]. В частности, авторы [Wilson et al., 1967] предложили метод для прямого измерения длины поглощения λ_s по данным пары подходящих НМ. Например, GLE17 28 января 1967 г. было зарегистрировано двумя канадскими НМ Калгари и г. Сульфур на высотах 1128 и 2283 м соответственно. Эти две станции имеют очень близкие жесткости геомагнитного обрезания и конусы приема, что и позволило непосредственно определить величину $\lambda_s = 103 \pm 3$ г/см². При использовании метода двух длин поглощения обычно принимают значения: $\lambda_g = 140$ г/см² для нейтронов, образованных ГКЛ, и $\lambda_f = 100$ г/см² – в случае СКЛ.

4.1. Описание базовой методики

Распределенную по земному шару сеть НМ можно рассматривать как единый многонаправленный спектрометр для измерения характеристик потока релятивистских СКЛ за пределами магнитосферы Земли. Моделируя отклик НМ на анизотропный поток СКЛ и решая обратную задачу, можно получить характеристики релятивистских солнечных протонов вне магнитосферы Земли [Shea and Smart, 1982; Humble et al., 1991; Cramp et al., 1997; Vashenyuk et al., 2009a, b]. Эта базовая методика требует данных не менее 25-ти станций НМ и достаточного по величине наземного возрастания ($\geq 10\%$). Поэтому обычно эта методика применяется для изучения только довольно крупных событий. Основные характеристики СКЛ – энергетический спектр, анизотропия и

питч-угловое распределение – определяются при этом методами оптимизации при сравнении модельных откликов НМ с наблюдаемыми. Параметры потока СКЛ, определенные в последовательные моменты времени, позволяют проследить его динамику. Методы анализа включают в себя определение асимптотических направлений прихода СКЛ путем расчета траекторий этих частиц в современных моделях геомагнитного поля. Следуя наиболее современному изложению метода [Vashenyuk et al., 2009a, b], мы приведем ниже некоторые подробности, важные для определения спектра СКЛ, их анизотропии и описания других свойств GLE.

Нейтронный монитор имеет специфическую диаграмму направленности. При увеличении зенитного угла вместе с ослаблением потока частиц из-за поглощения, растет телесный угол приема прибора. В результате появляется максимум диаграммы направленности; для ГКЛ он достигается при зенитных углах $\theta = 20^\circ$, для СКЛ – при $\theta = 18^\circ$. Асимптотические направления прихода КЛ определяются путем интегрирования уравнения движения пробной частицы с отрицательным зарядом и массой протона, выпущенной вверх с высоты 20 км над данной станцией (20 км – это средняя высота образования вторичных нейтронов, которые дают вклад в счет НМ). С помощью методов оптимизации параметры СКЛ могут быть получены по данным сети станций НМ. Выражение для функции отклика НМ на анизотропный поток солнечных протонов имеет вид [Vashenyuk et al., 2009a, b]:

$$\left(\frac{\Delta N}{N_g}\right)_j = \frac{1}{8} \frac{\sum_{(\varphi, \theta)=1}^8 \sum_{R_{\min}}^{R_{\max}} J_{\parallel}(R) F(\theta(R)) S(R) A_{(\varphi, \theta)}(R) \Delta R}{N_g}, \quad (1)$$

где $(\Delta N/N_g)_j$ – относительное возрастание скорости счета НМ на станции с номером j ; N_g – фон ГКЛ перед началом возрастания; $J_{\parallel}(R) = J_0 R^{-\gamma^*}$ – дифференциальный спектр по жесткости из направления источника с переменным наклоном; $\gamma^* = \gamma + \Delta\gamma(R - 1)$, где γ – показатель степенного спектра при $R = 1$ ГВ; $\Delta\gamma$ – скорость приращения γ на 1 ГВ; J_0 (м⁻² с⁻¹ стер⁻¹ ГВ⁻¹) – константа нормировки. Такая форма представления позволяет описать спектр произвольной формы с помощью 3-х параметров: γ , $\Delta\gamma$, и J_0 [Cramp et al., 1997]. Другие параметры в выражении (1): $S(R)$ – удельная функция сбора [Debrunner et al., 1984]; $\theta(R)$ – питч-угол при данной жесткости (точнее, угол между асимптотическим направлением для данной жесткости и расчетной осью анизотропии, задаваемой координатами Φ и Λ , в солнечно-эклиптической системе координат GSE); величина $A(R) = 1$ для разрешенных и 0 для запрещенных траекторий; $F(\theta(R)) \sim \exp(-\theta^2/C)$ – питч-угловое

распределение СКЛ с характеристическим параметром C .

Первая сумма в формуле (1) учитывает вклад в отклик НМ всех 8-ми секторов, на которые разделен телесный угол приема прибора [Vashenyuk et al., 2009a, b]. Суммирование учитывает также вклад наклонно падающих на НМ частиц. Вторая сумма производит сложение всех частей отклика НМ по всем жесткостям в пределах от 1 до 20 ГВ с шагом $\Delta R = 0.001$ ГВ. Расчет откликов НМ в выражении (1) производится последовательно при различных значениях параметров анизотропного потока солнечных протонов за пределами магнитосферы Земли ($\Phi, \Lambda, J_0, \gamma, \Delta\gamma, C$). Затем значения этих параметров в каждый данный момент времени определяются методом оптимизации путем сравнения расчетных откликов наземных детекторов с наблюдаемыми. С этой целью решается система условных уравнений для отыскания минимума функции:

$$F = \sum_j \left[\left(\frac{\Delta N}{N} \right)_j^{\text{вычисл}} - \left(\frac{\Delta N}{N} \right)_j^{\text{набл}} \right]^2 \Rightarrow \min, \quad (2)$$

где верхние индексы соответствуют вычисленным по (1) и полученным из наблюдений откликам j -го нейтронного монитора. Наблюдаемое питч-угловое распределение не всегда может быть описано функцией, близкой к функции Гаусса, или комбинацией двух потоков из противоположных направлений, что наблюдается в случаях так называемой двунаправленной анизотропии. Авторы [Vashenyuk et al., 2009a, b] использовали выражение для питч-углового распределения сложной формы, которое позволяет добиться хорошей сходимости процесса оптимизации:

$$F(\theta(R)) \sim \exp(-\theta^2/C) \left(1 - a \exp(-(\theta - \pi/2)^2) \right) / b. \quad (3)$$

Такая функция имеет особенность при значениях питч-угла, близких к $\pi/2$, и, в принципе, может учитывать особенности в питч-угловых распределениях, предсказываемые теорией распространения частиц в ММП [Топтыгин, 1983; Базилевская и Голынская, 1989]. По своим свойствам выражение (3) близко к функции, применявшейся в работе [Cramp et al., 1997] для описания сложных случаев питч-углового распределения. При использовании функции (3) к 6-ти вышеперечисленным параметрам потока СКЛ добавляются еще два: a и b . При нулевом значении этих параметров выражение (3) переходит в обычную функцию Гаусса.

Следует отметить, что в течение последних десятилетий предпринимались попытки [Lovell et al., 1998; Belov et al., 2005; Bombardieri et al., 2006; Крымский и др., 2008; Firoz et al., 2010; Andriopoulou et al., 2011] усовершенствовать базовую методику анализа GLE, описанную выше. Однако, в

отличие от комплексного анализа временных профилей СКЛ на разных стадиях GLE [Vashenyuk et al., 2009a, b], в большинстве указанных работ усилия авторов были нацелены в основном на анализ свойств одной лишь изотропной стадии GLE.

Альтернативный метод спектрографической глобальной съемки был предложен иркутскими исследователями [Dvornikov and Sdobnov, 1997]. Метод опирается на решение системы нелинейных алгебраических уравнений, в которых учитываются распределение по земному шару амплитуд вариаций интегральных потоков различных вторичных компонент, функция связи между первичными и вторичными вариациями, изменения планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания за каждый час наблюдений и другие факторы. Для анализа GLE42 (29 сентября 1989 г.) авторы использовали данные более 30-ти станций КЛ, включая данные Саянского спектрографического комплекса и Иркутского МТ. Сравнение с результатами [Cramp et al., 1993] свидетельствует о существенных различиях между двумя методами, особенно в области больших амплитуд на ранних стадиях GLE42.

Одно из серьезных слабых мест, общих для всех упомянутых методик, — это недостаточное знание функций отклика различных (стандартных) наземных детекторов. Это касается, в частности, нейтронных мониторов в области сравнительно малых энергий СКЛ ≤ 2 ГэВ [Struminsky and Belov, 1997]. Последнее обстоятельство было вновь отмечено авторами прямого космического эксперимента PAMELA [Adriani et al., 2011] при попытке согласовать спектральные данные различных детекторов в интервале энергий от 80 МэВ/нуклон до 3 ГэВ/нуклон по измерениям во время GLE70 (13 декабря 2006 г.). Учитывая точность оценок абсолютных интенсивностей потоков ускоренных солнечных частиц по данным НМ, авторам [Adriani et al., 2011] удалось достигнуть разумного согласия между потоками, измеренными в эксперименте PAMELA, и оцененными по данным НМ. Однако спектры по данным PAMELA оказывались всегда жестче в низкоэнергичном диапазоне, чем спектры, полученные по данным НМ. Это может указывать на то, что функции отклика для нейтронных мониторов являются заниженными при энергиях ≤ 700 МэВ. Во время второго прохождения спутника над полярной шапкой указанная разница в потоках на НМ и PAMELA стала больше, тогда как согласие между данными PAMELA и наземного эксперимента Ice Top (Антарктида) оставалось очень хорошим. Правильность данных PAMELA была подтверждена также прямыми измерениями потоков СКЛ в стратосфере.

4.2. Спектры быстрой и медленной компонент

Пользуясь описанной выше методикой, авторы [Vahenyuk et al., 2009a, b, 2011] провели анализ 35-ти крупных событий GLE за период с 1956 по 2006 гг. В каждом из них, за редким исключением, видно присутствие двух компонент: быстрой (БК) – с экспоненциальным энергетическим спектром, и медленной (МК) – со степенным спектром. Следует отметить, что при определении параметров спектров, к тому же в шкале жесткостей, форма спектра явным образом не задавалась. Уже затем форма спектров, полученных при решении обратной задачи, определялась по лучшему согласию с одним из двух представлений – экспоненциальным или степенным. В табл. 4 приведены параметры спектров для каждого из 35-ти событий [Vahenyuk et al., 2011]. Для БК – это параметры J_0 и E_0 экспоненциального спектра

$$J(E) = J_0 \exp(-E/E_0), \quad (4)$$

а для МК – это параметры J_1 и γ степенного спектра

$$J(E) = J_1 E^{-\gamma}, \quad (5)$$

где J_0 и J_1 имеют размерность $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1} \text{ГэВ}^{-1}$, E и E_0 – ГэВ. Полученные из этих данных средние величины равны: $\langle E_0 \rangle = 0.52 \pm 0.15$ ГэВ, $\langle \gamma \rangle = 4.85 \pm 0.25$. Заметим, что временное разделение потоков СКЛ на БК и МК и изучение других тонких деталей в отдельном наземном возрастании стало возможным только благодаря высокой точности регистрации GLE с помощью нейтронных супермониторов СНМ-64 [Carmichael, 1968].

4.3. Природа источников быстрой и медленной компонент

В ряде работ [Перес-Пераса и др., 1992; Perez-Peraza et al., 2009; Podgorny et al., 2010] делались попытки физической (модельной) интерпретации спектров для двух компонент СКЛ и их источников на Солнце. Было показано, что вероятным механизмом генерации БК может быть ускорение электрическим полем, возникающим при магнитном пересоединении в корональных токовых слоях. В результате спектр ускоренных протонов приобретает экспоненциальную форму $\sim \exp(-E/E_0)$. При этом, в частности для вспышки 14 июля 2000 г. [Podgorny et al., 2010], характерная энергия E_0 спектра оказалась равной 0.51 ГэВ (это близко к средней величине E_0 для большинства событий в табл. 4). В целом мы связываем генерацию БК с процессом ускорения электрическим полем, возникающим в области магнитного пересоединения в атмосфере Солнца.

В качестве наиболее вероятного источника МК предполагается стохастический механизм ускорения плазменной турбулентностью в возмущенной плазме вспышечного или коронального

выброса [Perez-Peraza et al., 2009]. Другим возможным механизмом является ускорение на ударной волне (УВ) в солнечной короне [Ellison and Ramaty, 1985]. Этот механизм эффективен, однако, лишь в области нерелятивистских энергий. Аргументом против механизма ускорения частиц СКЛ на УВ до релятивистских энергий служит то, что указанный механизм дает степенной спектр с показателем $\gamma \sim 2.5$, тогда как полученный из экспериментальных данных спектр МК имеет средний показатель $\gamma \sim 5$. Такой же показатель был получен в модели стохастического ускорения плазменной турбулентностью [Perez-Peraza et al., 2009].

Ускорение на УВ в солнечной короне и межпланетной среде имеет серьезные ограничения: для его реализации нужна “энергия инъекции” (предварительное ускорение). Кроме того, этот механизм обеспечивает максимальную энергию ускоренных частиц лишь ~ 1 ГэВ [Zank et al., 2000]. Более обстоятельные расчеты, с учетом современных полуэмпирических данных о высотном профиле плотности плазмы и уровне альфвеновской турбулентности в короне, привели к следующей формуле для спектра СКЛ [Бережко и Танеев, 2003]:

$$N(E) \propto E^{-\gamma} \exp[-(E/E_{\max})^\alpha]. \quad (6)$$

Это выражение содержит степенную часть с показателем $\gamma \approx 2$ (это сравнимо с оценкой [Ellison and Ramaty, 1985] для случая УВ) и экспоненциальный “хвост” с параметром $\alpha \approx 2.3 - \beta$, где β – показатель степени в спектре альфвеновских волн в короне. Характеристическая энергия E_{\max} может изменяться в широком диапазоне 1–300 МэВ в зависимости от скорости УВ. Формула (6) хорошо описывает спектр СКЛ в нерелятивистской области, но, по-видимому, не пригодна для описания релятивистской части спектра. Во всяком случае, при описании спектра выше 1 ГэВ для GLE42 на поздней стадии события 29 сентября 1989 г. (т.е. по существу только спектра МК) модель дает довольно неопределенные результаты, сильно зависящие от показателя спектра альфвеновской турбулентности $\beta = 0.5 - 1.5$. Быстрая компонента не рассматривается авторами [Бережко и Танеев, 2003] вообще.

Теория ускорения СКЛ до релятивистских энергий все еще далека от завершения. Отметим здесь самые последние результаты [Сомов и Орешина, 2011], полученные на основе концепции пересоединяющего токового слоя (ПТС). Согласно современным наблюдениям, электроны и протоны в солнечных вспышках ускоряются до высоких энергий почти одновременно в каждом “элементарном вспышечном всплеске” (ЭВВ). Длительность такого импульса-всплеска, по наблюдениям гамма- и жесткого рентге-

Таблица 4. Спектры двух компонент СКЛ в GLE 1956–2006 гг. [Vashenyuk et al., 2011a, b]

№ GLE	Дата вспышки	Радио II тип UT	Балл вспышки	Положение-вспышки	Параметры спектра			
					БК		МК	
					J_0	E_0	J_1	γ
05	23.02.1956	03:36	3	N23 W80	7.4×10^5	1.37	5.5×10^5	4.6
08	04.05.1960	10:17	3+	N13 W90	2.7×10^5	0.65	1.6×10^3	4.2
10	12.11.1960	13:26	3+	N27 W04	—	—	7.5×10^3	4.1
11	15.11.1960	02:22	3	N25 W35	—	—	1.0×10^5	5.3
13	18.07.1961	09:47	3+	S07 W59	5.2×10^3	0.52	3.6×10^3	6.0
16	28.01.1967	07:55	—	N22 W154	1.4×10^4	0.58	6.7×10^3	4.7
19	18.11.1968	10:26	1B	N21 W87	1.2×10^4	0.58	2.6×10^3	5.5
20	25.02.1969	09:04	2B/	N13 W37	7.7×10^4	0.38	4.7×10^3	5.0
22	24.01.1971	23:16	3B	N19 W49	3.4×10^4	0.45	8.7×10^3	5.8
23	01.09.1971	19:34	—	S11 W120	—	—	4.7×10^3	5.4
25	07.08.1972	15:19	3B	N14 W37	6.6×10^2	1.23	4.3×10^2	5.0
29	24.09.1977	05:55	—	N10 W120	6.5×10^2	1.14	9.3×10^2	3.2
30	22.11.1977	09:59	2B	N24 W40	1.5×10^4	0.77	1.1×10^4	4.7
31	07.05.1978	03:27	1B/X2	N23 W82	3.5×10^4	1.11	1.3×10^4	4.0
32	23.09.1978	09:58	3B/X1	N35 W50	—	—	7.0×10^2	4.7
36	12.10.1981	06:24	2B/X3	S18 E31	1.7×10^3	1.21	—	—
38	07.12.1982	23:44	1B/X2.8	S19W86	5.7×10^3	0.65	7.2×10^3	4.5
39	16.02.1984	09:00	—	— W132	—	—	5.2×10^4	5.9
41	16.08.1989	01:03	2N/X12.5	S15 W85	6.8×10^3	0.56	3.8×10^3	5.1
42	29.09.1989	11:33	—/X9.8	— W105	1.5×10^4	1.74	2.5×10^4	4.1
43	19.10.1989	12:49	3B/X13	S25 E09	4.0×10^4	0.53	3.0×10^4	4.8
44	22.10.1989	17:44	2B/X2.9	S27 W31	7.5×10^4	0.91	1.5×10^4	6.1
45	24.10.1989	18:00	2B/X5.7	S20 W57	2.4×10^4	0.72	1.1×10^5	4.9
47	21.05.1990	22:12	2B/X5.5	N35 W36	6.3×10^3	1.13	2.7×10^3	4.3
48	24.05.1990	21:00	1B/X9.3	N36 W76	2.8×10^4	0.60	9.1×10^3	4.3
51	11.06.1991	02:05	2B/X12.5	N32 W15	2.6×10^3	0.83	3.3×10^3	4.8
52	15.06.1991	08:14	3B/X12.5	N36 W70	—	—	5.8×10^3	4.6
55	06.11.1997	11:53	2B/X9.4	S18 W63	8.3×10^3	0.92	8.2×10^3	4.6
59	14.07.2000	10:19	3B/X5.7	N22 W07	3.3×10^5	0.50	5.0×10^4	5.4
60	15.04.2001	13:48	2B/X14.4	S20 W85	1.3×10^5	0.62	3.5×10^4	5.3
61	18.04.2001	02:17	—	— W120	2.5×10^4	0.52	1.2×10^3	3.6
65	28.10.2003	11:02	4B/X17.2	S16 E08	1.2×10^4	0.60	1.5×10^4	4.4
67	02.11.2003	17:14	2B/X8.3	S14 W56	4.6×10^4	0.51	9.7×10^3	6.3
69	20.01.2005	06:44	2B/X7.1	N14 W61	2.5×10^6	0.49	7.2×10^4	5.6
70	13.12.2006	02:51	2B/X3.4	S06 W24	3.5×10^4	0.59	4.3×10^4	5.7

новского излучения, по-видимому, не превышает нескольких секунд [Курт и др., 2010]. Авторы работы [Сомов и Орешина, 2011] рассмотрели аналитическое решение релятивистского уравнения движения заряженных частиц в пересоединяющем ТС с трехкомпонентным магнитным полем ($B_0 \approx 100$ Гс; $B_{\parallel} \approx 0.1B_0$; $B_{\perp} \approx 5 \times 10^{-4} B_0$) и сильным

электрическим полем E_a (до ~ 30 В/см), обусловленным процессом магнитного пересоединения. При этом вдоль электрического поля частицы ускоряются до скорости порядка скорости света, а их кинетическая энергия пропорциональна времени, проведенному в ПТС. Численное решение уравнения для приведенных выше параметров B и

E_a показывает, что электроны могут быть ускорены за время $2 \times 10^{-7} - 10^{-3}$ с при размерах области ускорения $\sim 7 \times 10^2 - 3 \times 10^7$ см; для протонов аналогичные оценки будут, соответственно, $10^{-4} - 2 \times 10^{-2}$ с и $\sim 3 \times 10^5 - 7 \times 10^8$ см. Эти оценки, однако, не решают проблему формирования спектра СКЛ в целом, включая быструю и медленную релятивистские компоненты. Подчеркнем, что любая теория ускорения должна непротиворечивым образом объяснить основные свойства двух компонент: БК наблюдается в начальной фазе события, имеет короткую продолжительность, сильную анизотропию и экспоненциальный спектр по энергиям; МК имеет плавный временной профиль, слабую, иногда двунаправленную анизотропию и степенной энергетический спектр.

4.4. Новая концепция GLE

Гипотеза о существовании двух компонент релятивистских СКЛ была выдвинута нами в конце 1980-ых годов и уже более двух десятилетий в разных вариантах обсуждается в литературе [Miroshnichenko and Perez-Peraza, 2008]. Так, например, Shea and Smart [1996] обратили внимание на то, что “двойная структура” временных профилей интенсивности некоторых GLE проявилась не только в 22-ом цикле СА, но и в 19–21-ом циклах, например, в событиях 15 ноября 1960 г. (GLE11) и, возможно, 7 августа 1972 г. (GLE25). Станции, где регистрировались такие структуры, были обычно полярными станциями с узкими асимптотическими конусами приема, “смотрящими” в направлении приходящих первых солнечных частиц. В любом случае, первоначальный “когерентный всплеск” (или спайк) интенсивности релятивистских СКЛ в самом начале GLE может быть более общим явлением, чем думали ранее. В частности, Shea and Smart [1997] представили свидетельства того, что в событии 22 октября 1989 г. имели место две отдельные инжекции релятивистских протонов от Солнца, разделенные интервалом $\sim 10 - 20$ мин.

В связи с этим особый интерес представляют данные спутниковых измерений в том же событии [Nemzek et al., 1994]. Авторы проанализировали временные профили интенсивности протонов по измерениям на двух геостационарных спутниках в зависимости от энергии протонов. Они обнаружили, что “пик”, столь ярко проявившийся в данных нейтронных мониторов, присутствовал и в нерелятивистской области вплоть до энергий ~ 15 МэВ. Вместе с тем, как следует из подробного анализа [Miroshnichenko et al., 2000], ничего подобного не наблюдалось на КА GOES-7 во время события 29 сентября 1989 г. Этот КА зарегистрировал событие в нескольких низкоэнергичных каналах, но во всех каналах был зафик-

сирован только довольно сглаженный (плавный) временной профиль с единственным пиком. Интенсивность начала резко возрастать ранее 12:00 UT и постепенно достигла своего максимального значения. Пик был зафиксирован после 13:00 UT, в зависимости от энергии частиц в данном канале. Важно отметить, что ни один из низкоэнергичных каналов не наблюдал каких-либо особенностей временных профилей, хотя все они измеряли частицы с жесткостями < 2 ГВ. Даже канал с наиболее высокими энергиями в интервале 640–850 МэВ (1.6–2.3 ГВ), доступном для наблюдений на НМ, зафиксировал постепенное возрастание до максимума. Этот единственный пик на КА GOES-7 наблюдался в момент, когда на НМ был зафиксирован второй пик. Иными словами, первый пик, наблюдавшийся на НМ, был обусловлен протонами с жесткостью $R > 2.3$ ГВ. Если бы GOES-7 “смотрел” в другом (обратном) направлении, такой вывод был бы менее поразительным; в данной ситуации он может лишь указывать на то, что GOES-7 находился в неблагоприятном положении для регистрации первого пика.

Завершая это обсуждение, отметим некоторые теоретические исследования испускания и межпланетного распространения релятивистских солнечных частиц. Так, Fedorov et al. [1997] на основе кинетического уравнения Больцмана для частиц с анизотропным начальным распределением показали, что амплитуды и временные профили, наблюдаемые во время анизотропных GLE, будут зависеть от направления асимптотических конусов приема излучения нейтронных мониторов по отношению к направлению переноса частиц в ММП. Такой подход был использован авторами [Fedorov et al., 1997] применительно к GLE48 (24 мая 1990 г.). Оно отличалось сильной анизотропией в начале события и имело некоторые признаки двукратной инжекции СКЛ. Для описания этих особенностей авторы предположили, что в событии GLE48 имела место длительная инжекция, зависящая от энергии частиц. Такой подход, однако, представляется нам недостаточным для того, например, чтобы объяснить большое временное запаздывание между анизотропным пиком на нескольких наземных станциях и сглаженным изотропным максимумом на других НМ, если только не допустить возможность второй инжекции СКЛ. Заметим, что межпланетное распространение не может существенно изменить спектр релятивистских протонов. Таким образом, мы рассматриваем полученные выше закономерности для двух компонент СКЛ как следствие процессов ускорения на Солнце.

5. МАКСИМАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ СКЛ

Выше мы уже кратко упоминали проблему измерения и интерпретации предельной энергии E_m , которую может обеспечить ускоритель частиц на Солнце. В частности, были отмечены всплески интенсивности вторичных мюонов на глубине ~ 200 м в.э. [Schindler and Kearney, 1973] в связи с солнечными вспышками. Однако их величина не превышала уровень 3σ . Впоследствии на Большом Подземном Сцинтилляционном Телескопе (БПСТ) был уверенно зафиксирован так называемый “Баксанский эффект” – кратковременные мюонные всплески (с амплитудой до 5.5σ), которые четко коррелируют с GLE. К концу 2005 г. в списке мюонных всплесков на БПСТ числилось уже 34 события [Karpov and Miroshnichenko, 2007].

5.1. Ранние результаты

Состояние этого вопроса освещалось многими авторами [Karpov et al., 1998; Miroshnichenko, 2001; Мирошниченко, 2003а; Miroshnichenko and Perez-Pegaza, 2008]. Несмотря на ограниченность экспериментальных возможностей, скудость наблюдательных данных и теоретические трудности, интерес к проблеме по-прежнему сохраняется ввиду ее фундаментального характера. Фактически результаты БПСТ дали новый толчок для поисков верхнего предела энергии СКЛ по данным нестандартных детекторов КЛ [Falcone and Ryan, 1999; Ryan et al., 2000; Ding et al., 2001; Tonwar et al., 2001; Poirier and D’Andrea, 2002; Wang, 2009]. Ниже мы приведем некоторые результаты, полученные разными исследователями за последние годы. Речь пойдет в основном о наиболее выдающихся GLE последнего (23-го) цикла солнечной активности. К ним можно отнести события 6 ноября 1997 г. (GLE55), 14 июля 2000 г. (GLE59, или BDE), 15 апреля 2001 г. (GLE60), 28 октября 2003 г. (GLE65) и 20 января 2006 г. (GLE69).

В эксперименте по изучению ШАЛ (AGASA, Япония), например, были получены свидетельства того, что во время вспышки 4 июня 1991 г. на Солнце могли рождаться нейтроны с энергией ≥ 10 ГэВ [Chiba et al., 1992], что соответствует энергии ускоренных протонов, по крайней мере, $E_p \geq 10$ ГэВ. В то же время измерения с помощью больших мюонных детекторов на установке GRAPES III (Ooty, Индия) в марте 1988–январе 1999 гг. не дали статистически значимых результатов [Kawakami et al., 1999]. Напротив, измерения на установке Milagrito (водный черенковский детектор) во время GLE55 позволили обнаружить определенный эффект в канале с высоким энергетическим порогом [Falcone and Ryan, 1999]. Хотя пороги регистрации для этого детектора были известны не очень точно,

можно утверждать, что энергия приходящих солнечных протонов заведомо превышала 10 ГэВ.

5.2. Эксперименты на больших детекторах

Определенные надежды на регистрацию эффектов от солнечных вспышек группа исследователей в ЦЕРНе [Tonwar et al., 2001] возлагала на установку из 50-ти сцинтилляционных счетчиков-детекторов ШАЛ, размещенных над мюонным детектором L3 (международная коллаборация “L3 + C experiment”). Было отмечено, в частности, заметное увеличение скорости счета сцинтилляционных счетчиков 14 июля 2000 г., близко к моменту времени, когда наземная сеть НМ зафиксировала GLE59. Однако это увеличение, как и другие 42 эпизода за 353 дня регистрации ШАЛ, не поддается однозначной интерпретации (возможен вклад чисто атмосферных эффектов, в частности, влажности воздуха). Коллаборация сообщила также о результатах измерений потоков мюонов во время того же события [Ding et al., 2001; Achard et al., 2006]. Измерения проводились с помощью высокоточного спектрометра мюонов высокой энергии. Спектрометр позволял направленно регистрировать мюоны с энергией выше 15 ГэВ, что соответствует энергии первичных протонов выше 40 ГэВ. Авторы сообщили, что некоторый избыток мюонов (4.2σ) был зафиксирован одновременно с пиком возрастания потоков СКЛ при меньших энергиях. Вероятность того, что избыток мюонов был случайной флуктуацией фона, составляет 1%. Ни одной подобной флуктуации не наблюдалось в течение 1.5 ч после солнечной вспышки.

По-видимому, гораздо более четкого эффекта следовало ожидать от вспышки 15 апреля 2001 г., как это и наблюдалось в действительности [Poirier and D’Andrea, 2002; Карпов и др., 2005]. Однако детекторы ШАЛ в ЦЕРНе в этом случае не отметили никакого увеличения скорости счета [Tonwar et al., 2001], скорее всего, из-за большого зенитного угла Солнца ($>60^\circ$). По данным НМ нами были оценены максимальные значения интегрального потока релятивистских протонов для событий 14 июля 2000 г. (BDE) и 15 апреля 2001 г. Спектр СКЛ 14 июля 2000 г. оказался весьма мягким, поэтому не удивительно, что событие BDE не вызвало статистически значимых эффектов на нестандартных детекторах.

Событие 15 апреля 2001 г. (GLE60) обладало более жестким спектром ($\gamma \sim 3.0$). Эффекты от солнечных протонов были зафиксированы, в частности, на установках Project GRAND Агау (возрастание интенсивности мюонов с амплитудой более 6.0σ) [Poirier and D’Andrea, 2002] и “Андырчи” ($\sim 10\sigma$) [Карпов и др., 2005]. Согласно [Poirier and D’Andrea, 2002], наиболее вероятная энергия первичных протонов СКЛ в этом событии близка к 100 ГэВ при

показателе дифференциального спектра ~ 2.0 . Такая величина показателя представляется нам нереальной, оценка E_p также явно завышена. Основная трудность в интерпретации этих данных связана с отсутствием надежных функций отклика для установки GRAND. Та же трудность характерна для установки “Андырчи” [Карпов и др., 2005] и других нестандартных детекторов.

Используя метод и параметры оптимизации [Achard et al., 2006] для отбора событий, Wang [2009] по данным измерений спектрометра мюонов высокой энергии на установке “L3+C experiment” обнаружил избыток мюонов величиной 5.7σ в том же участке неба, что и авторы эксперимента. При этом продолжительность эффекта совпала со временем, когда наблюдались пиковый поток протонов более низких энергий, рентгеновское и гамма-излучение. С помощью численного моделирования методом Монте-Карло было показано, что всплеск интенсивности мюонов был вызван первичными протонами с энергией $E_p > 40$ ГэВ, с наиболее вероятной энергией ~ 82 ГэВ. Опираясь на результаты моделирования, Wang [2009] оценил верхний предел потока таких протонов $\sim 2.5 \times 10^{-3} \text{ pfu}$. По мнению автора, протоны столь высокой энергии были ускорены на импульсной стадии вспышки 14 июля 2000 г., спустя 2 мин после начала всплесков жесткого X- и гамма-излучения.

Последнее из крупных наземных возрастаний СКЛ наблюдалось 20 января 2005 г. (GLE69). Это экстремальное событие, второе по рангу в числе 71-го GLE (табл. 2), дало возможность еще раз оценить максимальные возможности солнечного ускорителя. В частности, нейтронный монитор и мюонный детектор на горе Арагац (высота 3200 м над уровнем моря, жесткость геомагнитного обрезания $R_c = 7.6$ ГВ) зарегистрировали небольшие, но заметные возрастания [Bostanjyan et al., 2007]. Небольшие возрастания наблюдались также на НМ и солнечном нейтронном телескопе (СНТ) в Тибете ($R_c = 14.1$ ГВ, высота 4310 м над у.м.) [Miyasaka et al., 2005; Zhu et al., 2007], а также на мюонном телескопе GRAND [D’Andrea and Poirier, 2005]. Эти установки подтвердили присутствие очень малых потоков протонов с энергией > 15 ГэВ. В работе [Bombardieri et al., 2008] на основе функций выхода [Debrunner et al., 1984] проведено моделирование отклика НМ, расположенных на уровне моря, на это событие. В результате получен вывод, что потоки СКЛ с большой жесткостью в событии GLE69 были малыми, они не могли вызвать существенного возрастания скорости счета на других НМ с высокой жесткостью геомагнитного обрезания. Это не противоречит результатам по спектрам, питч-угловому распределению и направлению прихода СКЛ, полученным самими авторами [Bombardieri et al., 2008] в том же событии.

Недавно нам удалось несколько продвинуться в понимании природы мюонных всплесков на БПСТ (“Баксанский эффект”) [Karpov and Miroshnichenko, 2007]. Была также заново оценена максимальная интенсивность первичных протонов, $I_p(\geq 500 \text{ ГэВ}) \sim (1.5 \pm 0.2) \times 10^{-6} \text{ pfu}$, породивших мюонный всплеск 29 сентября 1989 г. Это значение, по-видимому, можно удовлетворительно согласовать со спектром БК для GLE42 [Miroshnichenko et al., 2000]. Во всяком случае, при интегральном показателе спектра > 4.0 (табл. 2) эта оценка не противоречит величине $I_p (> 82 \text{ ГэВ}) \sim 2.5 \times 10^{-3} \text{ pfu}$ для события BDE [Wang, 2009].

Таким образом, нами впервые обобщены данные нестандартных детекторов о верхних пределах потоков солнечных протонов в релятивистской области и максимальной энергии СКЛ. Хотя эти данные отрывочны и не поддаются непротиворечивой интерпретации, они ставят вопросы принципиальной важности, в частности: действительно ли на Солнце могут ускоряться частицы до энергий $E_p \geq 500$ ГэВ или же мы имеем дело с каким-то специфическим эффектом солнечной модуляции ГКЛ? Эти вопросы поднимались и раньше, но лишь применительно к отдельным GLEs. Теория ускорения пока не может дать адекватного описания всего спектра СКЛ, особенно при $E_p \geq 100$ ГэВ, хотя для максимальной энергии имеются весьма простые оценки [Перес-Пераса и др., 1992], опирающиеся на модель токового слоя. Так, для GLE05 была получена оценка $E_m \approx 250$ ГэВ. Между тем, наблюдения таких событий, как 29 сентября 1989 г., 6 ноября 1997 г. и 15 апреля 2001 г. с помощью нестандартных детекторов, определенно свидетельствуют о наличии солнечных протонов с энергиями $E_p \geq 10$ ГэВ (и даже ≥ 100 ГэВ). Однако, пока нет достаточного количества детекторов, способных регистрировать вторичные мюоны от таких протонов. Отметим, что информация об анизотропии приходящих частиц может быть получена лишь при единичных точечных измерениях. Такие измерения осуществить не легко, хотя и возможно. В настоящее время, однако, ни один мюонный детектор не в состоянии измерять анизотропию СКЛ во время GLEs. В связи с этим Ryan et al. [2000] обоснованно считают, что несколько мюонных детекторов, обладающих достаточной чувствительностью по различным направлениям, могли бы идеально дополнить мировую сеть станций НМ.

6. ИСТОЧНИК GLE: ВСПЫШКА И/ИЛИ СМЕ?

Вопросы о природе GLE, об источниках и механизмах ускорения СКЛ обсуждаются уже несколько десятилетий. Особый интерес вызывает дилемма: “вспышка” или “СМЕ”? При этом идет

принципиальная дискуссия о том, какой из активных процессов на Солнце — вспышка, корональный выброс массы или их комбинация — ответствен за генерацию СКЛ. Прямого ответа на этот вопрос, по-видимому, дать невозможно, а косвенные аргументы сторонников той или иной точки зрения пока не приводят к консенсусу. Относительно релятивистских СКЛ имеется достаточно свидетельств о связи быстрой компоненты со вспышкой, а медленной — с СМЕ. В то же время некоторые авторы находят аргументы в пользу того, что СМЕ являются единственными ускорителями энергичных солнечных частиц. В качестве одного из аргументов часто используются характеристики ускоренных солнечных частиц (SEP) с энергиями на 1–2 порядка ниже, чем в случае GLE (в основном протоны с энергией ≥ 10 МэВ). Привлекаются также данные по солнечному радио-, рентгеновскому и гамма-излучению, измерения элементного состава SEP, их спектра и т.п. Все эти данные с большей или меньшей степенью детальности сопоставляются с характеристиками вспышки и/или СМЕ. Между тем, хорошо известно, что появление SEP на орбите Земли (солнечное протонное событие, или СПС) обусловлено рядом предшествующих, не всегда известных физических процессов. В частности, наблюдаемые SEP, по-видимому, подвержены влиянию процессов множественного и/или длительного ускорения в самом источнике [Мирошниченко, 2003б] и их распространения в межпланетном пространстве.

Одно из последних обсуждений всего этого круга вопросов состоялось на двух небольших рабочих встречах CDAW (Coordinated Data Analysis Workshop) в США (2009 г.). По итогам этой дискуссии был подготовлен специальный выпуск журнала *Space Science Reviews* (V. 171, 2012). Как отмечают редакторы [Gopalswamy and Nitta, 2012], события GLE составляют всего ~15% от полного числа больших СПС в течение цикла SA. Поэтому возникает естественный вопрос: какие должны быть особые условия на Солнце для генерации GLE? Большинство авторов выпуска связывают генерацию GLE, прежде всего, с СМЕ. Подробный анализ всех статей этого издания выходит за рамки данного обзора, однако ниже мы приведем наиболее существенные результаты.

6.1. Проблема первых частиц GLE

Взрывное высвобождение энергии на Солнце дает начало вспышке и корональному выбросу массы (СМЕ). Считается, что рентгеновское и гамма-излучение связано со вспышками. Радиоизлучение является признаком возмущений, распространяющихся через корону и межпланетное пространство. Частицы могут приобретать энергию как во вспышках, так и в сопровождающих их волновых процессах. Поэтому трудно выделить

признаки ускорительных механизмов из наблюдений частиц. Однако логично считать, что ранняя фаза событий GLE находится ближе всего к моменту ускорения, а роль межпланетного переноса минимальна для первых проходящих частиц.

Экстремально большие события обеспечивают наилучшую возможность для изучения ранней фазы благодаря высокому отношению сигнала к уровню шума, а релятивистские солнечные протоны являются наиболее подходящими кандидатами для подхода к проблеме ускорения частиц. Пионерская работа по этому вопросу принадлежит [Cliver et al., 1982]. Впоследствии этим вопросом занимались Kahler et al. [2003], Bazilevskaya [2009], Firoz [2010], Aschwanden [2012], Gopalswamy et al. [2012]. Как показали Bazilevskaya [2009] и Aschwanden [2012], первые релятивистские частицы (БК) покидают Солнце в момент, близкий к максимуму жесткого рентгеновского излучения и высокоэнергичных гамма-лучей [Kuznetsov et al., 2011]. Эти виды излучений характерны для взрывной фазы вспышки. В отличие от первых частиц, МК появляется через 10–30 мин после БК, как раз в то время, когда развивается СМЕ. При этом не найдено никакой корреляции между потоками частиц и характеристиками СМЕ. Впереди расширяющегося СМЕ движется ударная волна (радиоисточник II типа). Ударная волна также способна ускорять частицы, производя степенной спектр с показателем $\gamma \sim 2.5$. Спектр МК имеет показатель $\gamma \sim 5$, более соответствующий стохастическому ускорению [Perez-Peraza et al., 2009]. Частицы, захваченные в петлеобразных магнитных структурах внутри расширяющегося СМЕ, ускоряются, взаимодействуя с плазменной турбулентностью. Адиабатические потери в такой ловушке оказываются малыми по сравнению с эффектом ускорения [Perez-Peraza et al., 2009]. Освобождение частиц из ловушки происходит при выходе СМЕ в верхнюю корону.

Совершенно неожиданный аспект обсуждаемой проблемы первых частиц СКЛ был выявлен недавно [Струминский и Зимовец, 2009] при анализе эффектов СКЛ в антисовпадательной защите ACS (сцинтилляционный детектор BGO весом 512 кг), который экранировал спектрометр SPI на борту орбитальной астрофизической обсерватории INTEGRAL. Как известно, временем прихода релятивистских протонов традиционно считают начало наземного возрастания (GLE), зарегистрированное одним из НМ мировой сети. Неточность и неоднозначность определения момента прихода солнечных протонов по данным НМ обусловлена как собственным фоном детектора (статистической точностью регистрации), так и вариациями порога жесткости геомагнитного обрезания и направления конуса приема проходящих частиц. Авторы указанной работы обратили внимание на то, что в некоторых случаях

GLEs увеличения скорости счета в детекторе ACS наблюдались явно раньше, чем на наземных НМ. Были обнаружены два случая, в которых детектор ACS SPI оказался более эффективным инструментом для наблюдения начала СПС-GLE на орбите Земли, чем сеть НМ: 17 января 2005 г. (GLE68) и 13 декабря 2006 г. (GLE70). По амплитуде возрастания эти события были довольно слабыми, при этом задержка прихода релятивистских протонов к Земле относительно всплеска жесткого рентгеновского излучения считалась значимой, что свидетельствовало о более позднем ускорении протонов. Между тем, возрастание темпа счета ACS SPI, вызванное приходом релятивистских протонов, наблюдалось раньше и соответствовало ускорению СКЛ в момент вспышки. Этот факт подчеркивает необходимость создания детекторов солнечных протонов и электронов космического базирования с низким уровнем собственного фона. Такие детекторы необходимы для измерения потоков КЛ малой интенсивности. Действительно, в отличие от двух отмеченных слабых GLEs, в двух других экстремально мощных событиях – 28 октября 2003 г. (GLE65) и 20 января 2005 г. (GLE69) – приход солнечных протонов на ACS SPI наблюдался одновременно с началом анизотропного возрастания на сети НМ, т.е. совпадал с приходом быстрой компоненты СКЛ.

6.2. GLE и состав ускоренных частиц

В самое последнее время ряд аспектов этой проблемы изучали Kahler et al. [2012]. В их работе отношения e/p и Fe/O для ряда GLEs сравнивались с характеристиками соответствующих вспышек и CMEs. Авторы исходят из того, что GLEs представляют собой крайний случай постепенных SEP-событий (СПС), которые обусловлены ударными волнами от широких и быстрых CMEs. Последние, в свою очередь, связаны с длительными (>1 ч) всплесками мягкого X-излучения (SXR). Однако, как выяснилось, некоторые большие постепенные СПС, включающие GLEs, связаны со вспышками небольшой длительности (<1 ч), сравнимыми по длительности с теми импульсными низкоэнергичными SEP-событиями, в которых наблюдаются повышенное содержание тяжелых элементов (например, большое отношение Fe/O), высокая степень ионизации частиц (например, иона Fe) и большое отношение e/p .

Чтобы определить, каким образом отношения e/p и Fe/O , измеренные в двух интервалах энергии, зависят от характеристик активных областей (АО), соответствующих вспышек и CMEs, Kahler et al. [2012] статистически исследовали 40 событий GLEs, зарегистрированных с 1976 г. Как выяснилось, с увеличением временных масштабов (длительности) вспышек и пиковых потоков мягкого (теплого) и жесткого (тормозного) рентге-

новского излучения, а также с ростом размеров АО отношения содержания элементов стремятся к более низким и устойчивым корональным значениям. Эти результаты, по мнению авторов, с учетом широкой области “гелиодолгот связи” источников GLEs, в которых наблюдаются повышенное содержание более тяжелых элементов, свидетельствуют против существенной роли вспышечных эффектов в этих GLEs. Авторы считают, что SEPs, сопровождающие GLEs, ускоряются преимущественно на фронтах ударных волн, вызванных CME, и что связь мощности и временных характеристик вспышки со свойствами CME могла бы объяснить корреляцию состава SEPs со свойствами вспышки. Даже если допустить, что вспышки дают основной вклад в GLEs, то и в этом случае не видно причины для наблюдаемой слабой тенденции к уменьшению отношений типа Fe/O при повышении фоновых интенсивностей SEPs. Поэтому авторы предпочитают альтернативную интерпретацию [Tylka et al., 2005]: высокое отношение Fe/O – это признак ускорения на ударной волне, которая вблизи Солнца является квази-перпендикулярной; по этой причине она ускоряет в основном “затравочную популяцию” вспышечных частиц. Поскольку в случае квази-перпендикулярных волн требуется более высокая энергии инъекции, то они втягивают в процесс ускорения в целом меньшую “затравочную популяцию”, чем квази-параллельные волны. В результате события с квази-перпендикулярными волнами вблизи Солнца будут, в общем, характеризоваться меньшими флюенсами протонов, по крайней мере, при более высоких энергиях, которые были достигнуты тогда, когда волна находилась ближе к Солнцу.

К этой весьма изысканной, но довольно противоречивой картине можно добавить результаты, изложенные в работе [Мирошниченко, 2003б]. Нами была предпринята попытка разделить восстановленные спектры испускания солнечных протонов в зависимости от их источников (импульсные или постепенные вспышки, ударные волны от CME). На примере нескольких СПС (в том числе – выдающегося GLE42) было обнаружено, что число ускоренных частиц, “оседающих” в атмосфере Солнца и вызывающих всплески гамма-излучения в линиях, оказывается систематически меньше, чем число убегающих частиц, регистрируемых у Земли в виде SEPs. Этот важный факт пока остается до конца не исследованным.

В результате рассмотрения проблемы в целом мы склоняемся к мнению, что физическая связь между вспышками CME и GLE, несомненно, существует. Однако закономерности этой связи не являются строго детерминированными, они, скорее, укладываются в концепцию “Синдрома Большой Вспышки”, которая была предложена и развита в ряде работ [Kahler, 1982; Kahler et al.,

2012]. Отчасти эту точку зрения разделяют и Kahler et al. [2012]: “В этом сценарии тенденция к снижению отношения содержания элементов с ростом плотности потоков мягкого X-излучения и радиоизлучения на частоте ~ 9 ГГц может быть интерпретирована в терминах “Синдрома Большой Вспышки” [Kahler, 1982], который сводится к тому, что все излучения эруптивного события меняют свой масштаб вместе, в данном случае это флюенсы SEPs и пиковые потоки электромагнитных излучений вспышки”.

6.3. Частота регистрации GLE

Полная статистика GLEs, накопленная за 70 лет наземных наблюдений СКЛ, уже позволяет изучать некоторые вопросы, связанные с пространственно-временными вариациями солнечной активности и свойствами глобального магнитного поля (ГМП) Солнца. Представляет интерес, например, распределение GLE по гелиодолготе их источников (вспышек). Установлено, что ММП является “направляющим” фактором при формировании потоков СКЛ. Хотя релятивистские частицы в своем движении к Земле, как правило, не претерпевают существенного рассеяния (иногда их транспортный пробег может быть сравним с 1.0 а.е.), но вероятность достигнуть Земли, очевидно, сильно зависит от угла закручивания паркеровской спирали ММП. Это приводит к довольно сильной зависимости частоты регистрации η от гелиодолготы источника: большинство источников связано с интервалом долгот $\sim 30^\circ \text{W} - 90^\circ \text{W}$. Поразительно, однако, что в 12-ти случаях СКЛ пришли к Земле даже от залимбовых источников. Примерно такой же вид имеет распределение источников для больших нерелятивистских СПС. Источники СПС, которые предположительно обусловлены ускорением на ударных волнах в межпланетном пространстве, имеют более однородное распределение, с максимумом на гелиодолготе $\sim 30^\circ \text{W}$ [Miroshnichenko, 2001].

Другой интересный аспект, характеризующий Солнце как звезду, был выявлен в результате вэйвлет-анализа частоты регистрации GLEs η в зависимости от уровня SA (по числу пятен) и эпохи солнечного цикла [Мирошниченко и др., 2012]. По датам событий из табл. 1 методом Морле (Morlett, Pulse Width Modulation) нами был построен PWM-ряд для параметра η , который содержит статистически значимую осцилляцию с периодом ~ 11 лет. При этом осцилляции η находятся в определенном сцеплении (когерентности) с временными рядами параметров фотосферы (числом пятен S) и короны (корональным индексом CI). Несмотря на ограничения статистики GLE и метода вэйвлет-анализа, эти результаты могут представлять интерес для понимания периодических явлений в солнечном динамо,

солнечной атмосфере, межпланетной среде и космических лучах.

Тенденция GLE группироваться в основном на восходящей и нисходящей ветвях солнечных циклов, по-видимому, обусловлена особенностями пространственно-временной структуры ГМП Солнца. Как известно, как раз вблизи максимумов SA происходит смена его знака. В связи с этим отметим результаты работы [Nagashima et al., 1991]. Для анализа указанной тенденции GLE эти авторы использовали данные MT и HM для 43-х GLE за период 1942–1990 гг. Было показано, что вспышки, вызывающие GLE, по существу являются запрещенными во время переходной фазы цикла, когда происходит изменение знака ГМП Солнца. Отсутствие GLE точно в максимуме SA авторы объясняют не угнетением процессов выхода СКЛ из-за сильных магнитных полей, а ухудшением эффективности ускорения частиц во время структурной перестройки ГМП.

Поскольку некоторые периодичности, найденные в работе [Мирошниченко и др., 2012], являются когерентными для параметров η , S и CI, на данной стадии исследования вопроса можно сделать вывод, что имеет место синхронизация осцилляций в различных слоях солнечной атмосферы – от фотосферы до короны. Это может свидетельствовать о том, что генерация СКЛ (GLE) является не локальным (изолированным) процессом, а затрагивает большие области в атмосфере Солнца.

7. ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ

Благодаря своему ионизирующему действию SEP – солнечные частицы с энергиями порядка десятков и сотен МэВ, играют существенную роль во многих геофизических процессах [Miroshnichenko, 2008]. Среди них наиболее известны эффекты опустошения озонового слоя, возмущения в глобальной цепи атмосферного электричества, изменение прозрачности земной атмосферы, генерация нитратов и космогенных изотопов и ряд других, менее изученных или пока предполагаемых (твердо не доказанных) явлений. Ниже мы коротко рассмотрим вклад в эти эффекты от релятивистских солнечных протонов. Заметим, что плотность энергии и общая энергия, вносимая СКЛ в атмосферу Земли, не сравнима с другими поступлениями энергии от Солнца в околоземное пространство. По этой причине СКЛ не являются основной причиной геофизических возмущений (по сравнению, например, с СМЕ и геомагнитной бурей). Однако, в силу своей спорадической природы, приход SEP может быть важной (“триггерной”) составляющей глобального механизма солнечно-земных связей.

7.1. Геофизические эффекты СКЛ

Проникновение SEP в полярную атмосферу должно неизбежно модифицировать состав и физико-химические процессы в мезосфере и стратосфере [Quack et al., 2001; Kirillov et al., 2007]. В работе [Quack et al., 2001] рассмотрено воздействие SEP на указанные процессы для трех GLEs, зарегистрированных в октябре 1989 г., июле 2000 г. и апреле 2001 г. в широком диапазоне энергий и с учетом временной эволюции их спектров. Изучались процессы генерации окислов азота NO_x и водорода HO_x , а также изменения содержания озона O_3 , проведено сравнение результатов расчетов для различных событий. Анализ проводился на основе модели, где учитывалось проникновение (осаждение) частиц в атмосферу и последующая модификация химии атмосферы.

В октябре 1989 г. сначала отмечался высокий уровень ионизации в нижней стратосфере, тогда как ионизация в мезосфере была на порядок меньше. Со временем уровень ионизации в нижней стратосфере не менялся (поскольку интенсивность частиц высокой энергии оставалась почти постоянной), тогда как в мезосфере ионизация существенно усилилась за счет прихода частиц малой энергии, интенсивность которых продолжала расти. Картина вариаций ионизации в июле 2000 г. выглядит более сложной по сравнению с октябрём 1989 г.: в то время как ионизация средней мезосферы была высокой, в верхней мезосфере ее уровень оказался ниже. Поскольку интенсивность частиц высокой энергии начинает уменьшаться довольно рано, скорости ионизации в стратосфере также снижаются по мере эволюции события. Лишь в верхней мезосфере скорости ионизации нарастают со временем. В апреле 2001 г. расчетные профили ионизации сравнимы по форме с профилями ионизации для события в октябре 1989 г., хотя абсолютные значения скоростей ионизации оказываются в $\sim 2-3$ раза меньше. Тем не менее, уровень ионизации с течением времени падает на всех высотах. Модель дает одинаковые результаты при экстраполяции спектров протонов до 500 или даже до 800 МэВ.

Исследования в том же направлении были проведены [Kirillov et al., 2007] для GLE70 (13 декабря 2006 г.). Изучался эффект воздействия энергичных солнечных протонов на химический состав средней атмосферы (20–80 км). Спектры протонов были получены по данным НМ, по измерениям в стратосфере и на космических аппаратах. Для расчетов генерации и потерь содержания малых составляющих атмосферы во время GLE использовалась одномерная модель, разработанная авторами ранее, с учетом ее зависимости от времени. Полученные оценки скорости опустошения озонового слоя оказались в хорошем согласии с данными измерений детектора Micro-

wave Limb Sounder (MLS) на борту КА AURA. По мнению авторов, главным фактором, вызывающим уменьшение содержания озона в средней атмосфере во время осаждения солнечных протонов, является генерация нечетных составляющих HO_x , с последующей рекомбинацией продуктов ионизации.

В заключение этого раздела рассмотрим известный эффект генерации космогенных изотопов космическими лучами в земной атмосфере на примере одной из последних работ в этой области [Webber et al., 2007]. Авторы выполнили детальные новые расчеты скорости (мощности) генерации космогенных изотопов ^3H , ^7Be , ^{10}Be и ^{36}Cl , пользуясь программным обеспечением FLUKA (Monte Carlo code) с учетом последних данных о сечениях взаимодействия для вертикально падающих протонов с энергиями от 10 МэВ до 10 ГэВ. Это позволило исследовать генерацию изотопов как за счет СКЛ, так и ГКЛ в области малых энергий, где мощность генерации является очень чувствительной функцией энергии. На примере событий в октябре–ноябре 2003 г. показано, что скорость генерации ^{10}Be в этих событиях достигла максимума при энергии ~ 100 МэВ, тогда как изотопы ^7Be и ^{36}Cl более интенсивно генерировались при энергии ~ 25 МэВ с “резонансным” сечением процесса. Если использовать более крутой спектр СКЛ, чем наблюдался в октябре–ноябре 2003 г., то максимум мощности генерации сдвинется в сторону меньших энергий, тогда как в случае более плоского спектра (как в событии 20 января 2005 г.) пик генерации будет сдвигаться к более высоким энергиям. Отметим, что для событий 2003 г. полная интегральная генерация изотопов ^7Be и ^{36}Cl за счет СКЛ будет в ~ 3 раза выше, чем генерация изотопа ^{10}Be . Это объясняется эффектом “резонанса”, наступающим при энергии протонов ~ 25 МэВ, которые и генерируют изотопы ^7Be и ^{36}Cl путем расщепления ядер атмосферного азота ^{14}N и атмосферного аргона ^{40}Ar соответственно.

Если анализировать годовую генерацию изотопа ^{10}Be , то только экстремальное событие 23 февраля 1956 г. могло дать значительный вклад. Для изотопа ^{36}Cl годовые значения генерации в $\sim 2-5$ раз выше, в зависимости от вида спектра СКЛ. Webber et al. [2007] провели расчеты годовых значений генерации ^{10}Be , ^{36}Cl и других изотопов на геомагнитной широте $>65^\circ$ для периода 1940–2006 гг., который перекрывает шесть 11-летних солнечных циклов. Средняя амплитуда 11-летней вариации годовых значений содержания этих изотопов составляет ~ 1.77 . Если учесть широтное перемешивание, то эта амплитуда уменьшится до 1.48 для средней глобальной генерации.

7.2. СКЛ в прогностических схемах

Среди многочисленных методик и схем гелиогеофизического прогнозирования, в середине 1980-ых годов начала рассматриваться идея использовать наземные наблюдения КЛ для целей краткосрочного прогноза различных явлений. В частности, было выдвинуто несколько интересных предложений использовать релятивистские солнечные протоны ($R \geq 1$ ГВ) в качестве предиктора СПС в нерелятивистской области. Так, Dorman et al. [1990] впервые рассмотрели возможность диагностики межпланетной среды и прогноза начала СПС на основе решения обратной задачи переноса СКЛ. Предполагалось по данным наблюдений до максимума СКЛ на орбите Земли сначала восстановить функцию их испускания на Солнце, а затем предсказать ход развития СПС на несколько часов вперед. Хотя методические аспекты такого подхода были достаточно обоснованы, оставалось неясным, каким способом предложенную схему можно проверить по данным наблюдений. Одна из трудностей состояла в том, что большой поток релятивистских протонов не всегда сопровождался таким же увеличением потока в нерелятивистской области. Впоследствии роль релятивистских СКЛ в прогностических схемах рассматривали многие авторы [Belov and Eroshenko, 1996; Dorman and Zuckerman, 2003; Mavromichalaki et al., 2009; Вашенюк и др., 2011; Веселовский и Яковчук, 2011; Perez-Peraza et al., 2011].

Belov and Eroshenko [1996] развили эмпирический подход к определению спектра солнечных протонов вблизи Земли в диапазоне энергий 10 МэВ–10 ГэВ непосредственно по данным наблюдений, без каких-либо предварительных предположений о возможной форме спектра. Их методика позволяла также реконструировать временной профиль интенсивности для протонов любой энергии. Вашенюк и др. [2011] предприняли попытку прогнозирования вида спектра максимальных потоков (СМП) для нерелятивистских протонов во время СПС по данным о спектре мягкой компоненты (МК) в соответствующем GLE. При этом спектр в области ≤ 500 МэВ рассматривается как естественное плавное продолжение спектра МК. На примере события GLE47 (21 мая 1990 г.) было показано хорошее согласие между спектром МК и его экстраполяцией в область низких энергий (≤ 430 МэВ), где проводились прямые измерения на КА “Метеор” и стратосферные измерения на шарах-зондах. Авторами предложена разумно ограниченная расчетная модель, в которой используются данные ~ 20 НМ. Она позволяет с достаточной для оперативного прогноза точностью получать спектры СКЛ в реальном времени и в автоматическом режиме решать ряд задач космической погоды.

Однако, как показали дальнейшие исследования, описанная выше схема носит пока пробный характер и не может претендовать на исчерпывающее решение проблемы. Недавно Веселовский и Яковчук [2011] проверили результаты применения метода Mavromichalaki et al. [2009], который был разработан для раннего оповещения о приходе к Земле солнечных протонов с $E_p \sim 10$ –100 МэВ на базе NMDB. Ретроспективный анализ и сравнение с наблюдениями за 2001–2006 гг. показали, что более 50% солнечных протонных событий при таком способе прогноза были пропущены. Для повышения надежности данного метода необходимо использовать дополнительные сведения о состоянии солнечной и гелиосферной активности.

Perez-Peraza et al. [2011] использовали особенности вариаций частоты регистрации GLE, чтобы разработать методику прогноза таких событий на период 24-го цикла СА. Пробный прогноз указывал, что очередного GLE71 следует ожидать между 12 декабря 2011 г. и 2 февраля 2012 г. Фактически GLE71 произошло 17 мая 2012 г. Оно оказалось небольшим и наблюдалось лишь на высоких широтах. Максимальное возрастание ($\sim 23\%$ по 5-минутным данным НМ) было зафиксировано на ст. Южный Полюс.

Практически важные аспекты космической погоды в связи с повышенной частотой GLE в 23-ем цикле СА детально рассмотрели Shea and Smart [2012]. Они представили результаты расчетов дозы радиации для самолетов на полярных трассах для каждого из событий GLEs прошлого цикла. Особый интерес представляют эффекты космической погоды во время больших солнечных событий в октябре и ноябре 2003 г. Авторы подчеркивают важность усилий по использованию данных НМ для прогноза СПС в области наиболее радиационно-опасных энергий СКЛ (десятки–сотни МэВ). Такой прогноз обеспечивает возможность с некоторой заблаговременностью предупредить экипажи самолетов и космических кораблей о предстоящей угрозе облучения.

8. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Из нашего рассмотрения следует, что все значительные GLE, т.е. события с хорошо развитым временным профилем, демонстрируют четко выраженную двухкомпонентную структуру: сначала наблюдается быстрая компонента (БК), а затем запаздывающая, медленная компонента (МК). Наблюдательно БК и МК отличаются от друг друга тремя главными характеристиками: 1) формой временных профилей интенсивности – импульсообразным и плавным профилями; 2) питч-угловыми распределениями – анизотропным и близким к изотропному; и 3) формой энергетических спектров – жестким экспоненциальным и мягким

степенным спектрами соответственно. 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. Частицы МК могут быть ускорены стохастическим механизмом в замкнутых магнитных структурах над областью пересоединения; затем они выносятся во внешнюю корону при расширении коронального выброса вещества (СМЕ).

Вернемся теперь к вопросу, поставленному в специальном выпуске журнала *Space Science Reviews* [V. 171, 2012]: какими должны быть особые условия на Солнце для генерации GLE? Aschwanden [2012] склоняется к выводу, что БК в событиях GLE может иметь вспышечное происхождение в нижней короне, тогда как задержанная МК может быть генерирована двумя путями: длительным ускорением и/или захватом частиц в области вспышки, либо ускорением на корональной и межпланетной ударных волнах. С другой стороны, Gopalswamy et al. [2012] отмечают, что пока не найдено отчетливой корреляции между амплитудой GLE и параметрами вспышек или СМЕs. Тем не менее, имеются веские аргументы в пользу гипотезы, что перед началом GLE, как раз перед высвобождением частиц, в короне формируется УВ. Высвобождение частиц происходит в момент, когда СМЕs достигают высоты в среднем $\sim 3.09R_{\odot}$, по крайней мере, для магнитно-сопряженных источников на Солнце (W20–W90). Используя модель потенциального поля на поверхности источника (PFSS), Nitta et al. [2012] указывают, что только около половины всех GLEs являются хорошо магнитно-сопряженными с источниками. В то же время ни мощность СМЕs и вспышек, ни степень сложности АО на Солнце не обеспечивают достаточных условий для возникновения GLEs. Moraal and McCracken [2012] показали, что у GLE69 могло быть два источника – вспышка и сопутствующий СМЕ. Очень интересную особенность GLE отмечают Mewaldt et al. [2012]: в интервале энергий 45–80 МэВ/нуклон $\sim 50\%$ событий GLE имеют общие свойства с импульсными СПС, обогащенными ${}^3\text{He}$, включая обогащение другими ионами (повышенные отношения Ne/O , Fe/O , ${}^{22}\text{Ne}/{}^{20}\text{Ne}$) и высокое зарядовое состояние ионов Fe. Предполагается, что такие события вносят вклад в затравочную популяцию частиц, которые в дальнейшем ускоряются на ударных волнах, инициированных СМЕs. В статье Li et al. [2012] предлагается сценарий генерации GLE при взаимодействии двух СМЕs, которые были последовательно выброшены из короны над одной и той же АО. Первый СМЕ предполагается более узким и медленным по сравнению со вторым. Когда второй СМЕ догоняет первый, возникает процесс пересоединения

их магнитных структур. Тем самым комбинированный эффект ускорения на ударных волнах от обоих СМЕs будет усиливаться. Таким образом, единственный вывод, с которым, видимо, могут согласиться все исследователи GLEs, уже был сформулирован несколько лет назад [Cliver, 2009]: мы имеем дело с интенсивно развивающейся концепцией GLE (“эволюционирующей парадигмой”).

Детальная физическая картина процессов, приводящих к двухпиковой структуре GLE, до конца не ясна. Мы склонны считать, что гипотеза о “межпланетном происхождении” двух компонент не может полностью разрешить проблему. Есть также достаточно веские основания для того, чтобы в качестве основной модели генерации СКЛ принять модель с двумя источниками на Солнце. Такой подход, очевидно, не противоречит, а скорее подтверждает современную концепцию многократного ускорения частиц на Солнце. Таким образом, изучение СКЛ было и остается одним из наиболее эффективных инструментов для изучения физики Солнца и солнечно-земных связей.

Перспективы этого направления солнечно-земной физики вытекают из самого факта, что за 70 лет изучения СКЛ многие фундаментальные вопросы физики ускорения частиц (как на микро-, так и на макро-уровнях) так и остаются нерешенными. В перечень таких вопросов можно включить длительность и мощность инжекции ускоренных частиц, относительную роль ускорения и захвата (удержания) частиц (длительные события). Требуется дополнительное изучение вариации элементного состава и зарядового состояния ускоренных частиц от события к событию.

Вопросы, связанные с солнечными нейтронами и гамма-излучением солнечных вспышек [Miroshnichenko and Perez-Peraza, 2008; Valdes-Galicia et al., 2009; Miroshnichenko and Gan, 2012], непосредственно касаются физики ускорения, локализации источников СКЛ на Солнце и т.п. Однако они выходят далеко за рамки данного обзора. Для примера отметим только нерешенную проблему источника гамма-излучения в линии 2.223 МэВ в событии GLE42 [Miroshnichenko et al., 2000]. Пожалуй, самым большим вызовом для исследователей остаются те GLE, которые сопровождались длительным гамма-излучением высокой энергии (примерами таких событий могут служить GLE51 и GLE52). Среди геофизических приложений представляются важными детальные исследования ряда малоизученных эффектов СКЛ в земной атмосфере, с учетом современных возможностей слежения за ее текущим состоянием по измерениям на космических аппаратах.

Авторы выражают глубочайшую признательность нескольким поколениям исследователей,

которые многие годы обеспечивали и продолжают поддерживать работу мировой сети станций космических лучей. Мы благодарны всем коллегам-космофизикам, чьи материалы, идеи и результаты были использованы при подготовке данного обзора. Наша работа была поддержана грантами Национального Автономного Университета, г. Мехико (DGAPA Grants PAPIIT-IN1170009, DGAPA-INI 19209-3, IXTLI-0709013) и КОНАСИТ Мексики (089887). Частичную поддержку оказал РФФИ (гранты № 07-02-01405, № 08-02-92208, № 09-02-98511, № 11-02-08034, № 13-02-00612, № 13-02-91165-ГФЕН А). Работа была поддержана также грантом НШ-4573.2008.2. Авторы весьма признательны анонимному рецензенту, который внимательно прочитал рукопись и сделал ряд важных замечаний, что позволило существенно улучшить текст обзора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Базилевская Г.А., Гольнская Р.М.* Распространение солнечных космических лучей в межпланетной среде с учетом адиабатической фокусировки // *Геомагнетизм и аэрномия*. Т. 29. № 2. С. 204–209. 1989.
- *Бережко Е.Г., Танеев С.Н.* Ускорение солнечных космических лучей ударными волнами // *Письма в астрон. журн.* Т. 29. № 8. С. 601–615. 2003.
- *Ващенко Э.В., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б.* Прогноз радиационно-опасных потоков СКЛ по данным нейтронных мониторов // *Изв. РАН. Сер. физ.* Т. 75. № 6. С. 819–821. 2011.
- *Веселовский И.С., Яковчук О.С.* О прогнозе солнечных протонных событий по данным наземных нейтронных мониторов // *Астрон. вестник*. Т. 45. № 4. С. 365–375. 2011.
- *Губарев В.С.* Белый архипелаг Сталина. Документальное повествование о создании ядерной бомбы, основанное на рассекреченных материалах “Атомного проекта СССР” // М.: Молодая гвардия. 432 с. 2004.
- *Дорман Л.И.* Вариации космических лучей. М.: Гостехиздат, 492 с. 1957.
- *Дорман Л.И.* Вариации космических лучей и исследование космоса. М.: Изд-во АН СССР, 1027 с. 1963.
- *Дорман Л.И., Мирошниченко Л.И.* Солнечные космические лучи. М.: Наука, 468 с. 1968.
- *Каминер Н.С.* Об учете барометрического эффекта нейтронной компоненты во время вспышек космических лучей // *Геомагнетизм и аэрномия*. Т. 7. № 5. С. 806–809. 1967.
- *Карпов С.Н., Ващенко Э.В., Волченко В.И. и др.* События GLE 23-го цикла солнечной активности по данным Баксанских ливневых установок Андырчи и Ковер и нового Баксанского нейтронного монитора // *Изв. РАН. Сер. физ.* Т. 69. № 6. С. 796–799. 2005.
- *Красильников Д.Д., Кузьмин А.И., Шафер Ю.Г.* Случай вспышек в интенсивности космических лучей // *Вариации интенсивности космических лучей*. Тр. Якутского филиала АН СССР, сер. физ. Вып. 1. М.: изд-во АН СССР. С. 41–47. 1955.
- *Кривоносов Ю.И.* Рукописное письмо С.И. Вавилова Сталину // *УФН*. Т. 170. № 9. С. 1021–1024. 2000.
- *Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Кривошапкин П.А., Стародубцев С.А., Транский И.А., Филиппов А.Т.* Вспышка космических лучей 29 сентября 1989 г. по данным Якутского комплекса установок // *ДАН СССР*. Т. 314. № 4. С. 824–826. 1990.
- *Крымский Г.Ф., Григорьев В.Г., Стародубцев С.А.* Новый метод оценки абсолютного потока и энергетического спектра солнечных космических лучей по данным нейтронных мониторов // *Письма в ЖЭТФ*. Т. 88. № 7. С. 483–485. 2008.
- *Курт В.Г., Юшков Б.Ю., Кудела К., Галкин В.И.* Высокоэнергичное гамма-излучение солнечных вспышек как индикатор ускорения протонов высоких энергий // *Космич. исслед.* Т. 48. № 1. С. 72–80. 2010.
- *Мирошниченко Л.И.* Генерация и перенос солнечных космических лучей (Обзор) // *Геомагнетизм и аэрномия*. Т. 32. № 6. С. 1–18. 1992.
- *Мирошниченко Л.И.* О предельных возможностях ускорителей частиц на Солнце // *Геомагнетизм и аэрномия*. Т. 34. № 4. С. 29–37. 1994.
- *Мирошниченко Л.И.* Верхний предел энергии солнечных космических лучей по данным нестандартных детекторов // *Изв. РАН. Сер. физ.* Т. 67. № 4. С. 462–464. 2003а.
- *Мирошниченко Л.И.* Многократное ускорение частиц на Солнце: Новый подход к разделению источников // *Изв. РАН. Сер. физ.* Т. 67. № 3. С. 400–405. 2003б.
- *Мирошниченко Л.И.* Физика Солнца и солнечно-земных связей. Ред. М.И. Панасюк. М.: Университетская книга. ISBN 978-5-91304-191-3. 174 с. 2011.
- *Мирошниченко Л.И., Перес-Пераса Х.А., Веласко-Эррера В.М., Запотитла Х., Ващенко Э.В.* Осцилляции галактических космических лучей и солнечных индексов перед приходом релятивистских протонов от Солнца // *Геомагнетизм и аэрномия*. Т. 44. № 5. С. 601–606. 2012.
- *Перес-Пераса Х., Гальегос-Крус А., Ващенко Э.В., Мирошниченко Л.И.* Спектр ускоренных частиц в солнечных протонных событиях с быстрой компонентой // *Геомагнетизм и аэрномия*. Т. 32. № 2. С. 1–12. 1992.
- *Сомов Б.В., Орешина А.В.* Магнитное пересоединение и ускорение частиц на Солнце // *Изв. РАН. Сер. физ.* Т. 75. № 6. С. 784–786. 2011.
- *Струминский А.Б., Зимовец И.В.* К оценке времени прихода первых релятивистских солнечных протонов на Землю // *Изв. РАН. Сер. физич.* Т. 73. № 3. С. 332–335. 2009.
- *Топтыгин И.Н.* Космические лучи в межпланетных магнитных полях. М.: Наука, 304 с. 1983.
- *Abbasi R., Ackermann M., Adams J. et al. (IceTop Collaboration).* Solar energetic particle spectrum on 2006 December 13 determined by IceTop // *Astrophys. J. Lett.* V. 689. L65–L68. 2008.
- *Achard P., Adriani O., Aguilar-Benitez M. et al. (L3 collaboration).* The solar flare of the 14th of July 2000 (L3 + C de-

- tor results) // *Astron. Astrophys.* V. 456. P. 351–357. 2006.
- Adams N. A temporary increase in the neutron component of cosmic rays // *Philos. Mag. Series 7.* V. 41. № 316. P. 503–505. 1950.
 - Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al. (Collaboration PAMELA). Observations of the 2006 December 13 and 14 solar particle events in the 80 MeV/n–3 GeV/n range from space with the PAMELA detector // *Astrophys. J.* V.742:102 (11pp), doi:10.1088/0004-637X/742/2/102. 2011.
 - Andriopoulou M., Mavromichalaki H., Plainaki C., Belov A., Eroshenko E. Intense Ground-Level Enhancements of solar cosmic rays during the last solar cycles // *Solar Phys.* V. 269. P. 155–168. 2011.
 - Aschwanden M.J. GeV particle acceleration in solar flares and Ground Level Enhancement (GLE) events // *Space Sci. Rev.* V. 171. P. 3–21. 2012.
 - Bazilevskaya G.A. On the early phase of relativistic solar particle events: Are there signatures of acceleration mechanism? // *Adv. Space Res.* V. 43. P. 530–536. 2009.
 - Belov A.V., Eroshenko E.A. Proton spectra of the four remarkable GLEs in the 22nd solar cycle // *Radiat. Meas.* V. 26. № 3. P. 461–466. 1996.
 - Belov A., Eroshenko E., Mavromichalaki H., Plainaki C., Yanke V. A study of the ground level enhancement of 23 February 1956 // *Adv. Space Res.* V. 35. P. 697–701. 2005.
 - Bombardieri D.J., Duldig M.L., Michael K.J., Humble J.E. Relativistic proton production during the 2000 July 14 solar event: The case for multiple source mechanisms // *Astrophys. J.* V. 644. P. 565–574. 2006.
 - Bombardieri D.J., Duldig M.L., Humble J.E., Michael K.J. An improved model for relativistic solar particle acceleration applied to the 2005 January 20 and earlier events // *Astrophys. J.* V. 682. P. 1315–1327. 2008.
 - Bostanjyan N.Kh., Chilingarian A.A., Eganov V.S., Karapetyan G.G. On the production of highest energy solar protons on 20 January 2005 // *Adv. Space Res.* V. 39. P. 1454–1457. 2007.
 - Carmichael H. High-energy solar-particle events // *Space Sci. Rev.* V. 1. P. 28–61. 1962.
 - Carmichael H. Cosmic Rays (Instruments) / *Ann. IQSY.* Cambridge, MA: MIT Press. V. 1. P. 178–197. 1968.
 - Chiba N., Dion G.M., Hayashida N. et al. Possible evidence for ≥ 10 GeV neutrons associated with the solar flare of 4 June 1991 // *Astropart. Phys.* V. 1. P. 27–32. 1992.
 - Chupp E.L. Evolution of our understanding of solar flare particle acceleration: (1942–1995) // *High Energy Solar Physics.* New York: AIP. V. 374. P. 3–31. 1996.
 - Cliver E.W., Kahler S.W., Shea M.A., Smart D.F. Injection onsets of ~ 2 GeV protons and ~ 1 MeV electrons and ~ 100 keV electrons in solar cosmic ray flares // *Astrophys. J.* V. 260. P. 362–370. 1982.
 - Cliver E.W. History of research on solar energetic particle (SEP) events: the evolving paradigm / *Universal Helio-physical Processes.* Proc. IAU Symp. № 257 (2008). Eds. N. Gopalswamy and D.F. Webb. International Astronomical Union. P. 401–412. 2009.
 - Cramp J.L., Duldig M.L., Humble J.E. The GLE of 29 September 1989 // *Proc. 23rd Int. Cosmic Ray Conf., Calgary, Canada.* V. 3. P. 47–50. 1993.
 - Cramp L.J., Duldig M.L., Flueckiger E.O., Humble J.E., Shea M.A., Smart D.F. The October 22, 1989, solar cosmic ray enhancement: An analysis of the anisotropy and spectral characteristics // *J. Geophys. Res.* V. 102. № A11. P. 24237–24248. 1997.
 - D’Andrea C., Poirier J. Ground level muons coincident with the 20 January 2005 solar flare // *Geophys. Res. Lett.* V. 32, L14102. 2005.
 - Debrunner H., Flueckiger E., Lockwood J.A. Response of neutron monitors to solar cosmic ray events // *Abstr. 8th European Cosmic Ray Symp. Rome.* 1984.
 - Ding L. on behalf of the L3 Collaboration. Search for possible enhancement in the flux of high energy muons due to the solar flare of 14 July 2000 with the L3 + Cosmic Muon Spectrometer // *Proc. 27th Int. Cosmic Ray Conf. Germany, Hamburg.* V. 8. P. 3372–3374. 2001.
 - Dorman L.I. The generation and propagation of solar cosmic rays // *Nuovo Cimento.* V. 8. Suppl. № 2. P. 391–402. 1958.
 - Dorman L.I., Venkatesan D. Solar cosmic rays // *Space Sci. Rev.* V. 64. № 3/4. P. 183–362. 1993.
 - Dorman L.I., Miroshnichenko L.I., Sorokin M.O. Cosmic ray data as a basis for predicting the onset and development of solar proton events / *Solar-Terrestrial Predictions*, Proc. Workshop at Leura, Australia, October 16–20, 1989. (Eds. R.J. Thompson, D.G. Cole, P.J. Wilkinson, M.A. Shea, D. Smart, and G. Heckman). NOAA, ERL, Boulder, Co. V. 1. P. 386–390. 1990.
 - Dorman L., Zukerman I. Initial concept for forecasting the flux and energy spectrum of energetic particles using ground-level cosmic ray observations // *Adv. Space Res.* V. 31. № 4. P. 925–932. 2003.
 - Duggal S.P. Relativistic solar cosmic rays // *Rev. Geophys. Space Res.* V. 17. P. 1021–1058. 1979.
 - Dvornikov V.M., Sdobnov V.E. Time variations of the cosmic ray distribution function during a solar proton event of September 29, 1989 // *J. Geophys. Res.* V. 102. № A11. P. 24209–24219. 1997.
 - Elliot H. The variations of cosmic ray intensity / *Progress in Cosmic Ray Physics.* Eds. J.G. Wilson and S.A. Wouthuysen. Amsterdam: North-Holland Publ. Co. V. 1. P. 453–514. 1952.
 - Ellison D.C., Ramaty R. Shock acceleration of electrons and ions in solar flares // *Astrophys. J.* V. 298. P. 400–408. 1985.
 - Falcone A., Ryan J. MILAGRO as a Solar Observatory // *Astropart. Phys.* V. 11. P. 283–285. 1999.
 - Fedorov Yu.I., Stehlik M., Kudela K., Kassovicova J. The GLE of May 24, 1990: Kinetic approach to anisotropic event // *Proc. 25th Int. Cosmic Ray Conf., Durban, South Africa.* V. 1. P. 193–196. 1997.
 - Firoz K.A., Cho K.-S., Hwang J. et al. Characteristics of ground-level enhancement-associated solar flares, coronal mass ejections, and solar energetic particles // *J. Geophys. Res.* V. 115. A09105. 2010.
 - Flückiger E.O., Butikofer R., Muraki Y. et al. A new solar neutron telescope at Gornergrat // *Rayos Cosmicos-98.*

- Proc. 16th European Cosmic Ray Symposium. Alcala University Press, Spain. Ed. J. Medina. P. 219–222. 1998.
- *Forbush S.E.* Three unusual cosmic-ray intensity increases due to charged particles from the Sun // *Phys. Rev. V. 70. № 9/10. P. 771–772. 1946.*
 - *Forbush S.E., Stinchcomb T.D., Schein M.* The extraordinary increase of cosmic-ray intensity on November 19, 1949 // *Phys. Rev. V. 79. P. 501–504. 1950.*
 - *Gopalswamy N., Nitta N.V.* Preface // *Space Sci. Rev. V. 171. P. 1–2. 2012.*
 - *Gopalswamy N., Xie H., Yashiro S., Akiyama. S., Mäkelä P., Usoskin I.G.* Properties of ground level enhancement events and the associated solar eruptions during solar cycle 23 // *Space Sci. Rev. V. 171. P. 23–60. 2012.*
 - *Hey J.S.* Solar radiations in the 4–6 metre radio wavelength band // *Nature. V. 157. № 3976. P. 47–48. 1946.*
 - *Humble J.E., Duldig M.L., Smart D.F., Shea M.A.* Detection of 0.5–15 GeV solar protons on 29 September 1989 at Australian stations // *Geophys. Res. Lett. V. 18. № 4. P. 737–740. 1991.*
 - *Kahler S.W.* The role of the big flare syndrome in correlation of solar energetic proton fluxes and associated microwave bursts parameters // *J. Geophys. Res. V. 87. № A5. P. 3439–3448. 1982.*
 - *Kahler S.W., Simnett G.M., Reiner M.I.* Onsets of solar cycle 23 ground level events as probes of solar energetic particle injections at the Sun // *Proc. 28th Int. Cosmic Ray Conf., Japan, Tsukuba. V. 6. P. 3415–3418. 2003.*
 - *Kahler S.W., Cliver E.W., Tylka A.J., Dietrich W.F.* A comparison of Ground Level Event e/p and Fe/O ratios with associated solar flare and CME characteristics // *Space Sci. Rev. V. 171. P. 121–139. 2012.*
 - *Karpov S.N., Miroshnichenko L.I., Vashenyuk E.V.* Muon bursts at the Baksan Underground Scintillation Telescope during energetic solar phenomena // *Nuovo Cimento. C. V. 21. № 5. P. 551–573. 1998.*
 - *Karpov S.N., Miroshnichenko L.I.* Method of additional fluctuations for search of weak signals // *Proc. 30th Int. Cosmic Ray Conf. Merida, Yucatan, Mexico. V. 6. P. 413–416. 2007.*
 - *Kawakami S., Aikawa Y., Ikeda N. et al.* Observation of cosmic ray modulation and possible detection of the solar flares with GRAPES III muon telescopes at Ooty // *Proc. 26th Int. Cosmic Ray Conf. Salt Lake City. USA. V. 7. P. 171–174. 1999.*
 - *Kirillov A.S., Balabin Yu.V., Vashenyuk E.V., Fadel Kh., Miroshnichenko L.I.* Effect of solar protons on the middle atmosphere composition during the GLE of 13 December 2006 // *Proc. 30th Int. Cosmic Ray Conf. Merida, Yucatan, Mexico. V. 2. P. 129–132. 2007.*
 - *Kuznetsov S.N., Kurt V.G., Yushkov B.Yu., Kudela K., Galkin V.I.* Gamma-ray and high-energy-neutron measurements on *CORONAS-F* during the solar flare of 28 October 2003 // *Solar Phys. V. 268. P. 175–193. 2011.*
 - *Lange I., Forbush S.E.* Further note on the effect on cosmic-ray intensity of the magnetic storm of March 1, 1942 // *Terr. Magn. Atmos. Electr. V. 47. № 4. P. 331–334. 1942.*
 - *Li G., Moore R., Mewaldt R.A., Zhao L., Labrador A.W.* A twin-CME scenario for Ground Level Enhancement events // *Space Sci. Rev. V. 171. P. 141–160. 2012.*
 - *Lovell J.L., Duldig M.L., Humble J.E.* An extended analysis of the September 1989 cosmic ray ground level enhancement // *J. Geophys. Res. V. 103. № A10. P. 23733–23742. 1998.*
 - *Mavromichalaki H., Souvatzoglou G., Sarlanis C., Mariatos G., Papaioannou A., Belov A., Eroshenko E., Yanke V. for the NMDB team.* Using the real-time Neutron Monitor Database to establish an Alert signal // *Proc. 31st Int. Cosmic Ray Conf. Lodz, Poland, Paper icrc1381. P. 4. 2009.*
 - *McCracken K.G.* The cosmic-ray flare effect. I. Some new methods of analysis // *J. Geophys. Res. V. 67. № 2. P. 423–434. 1962.*
 - *McCracken K.G., Dreschhoff G.A.M., Zeller E.J., Smart D.F., Shea M.A.* Solar cosmic ray events for the period 1561–1994. 1. Identification in polar ice, 1561–1950 // *J. Geophys. Res. V. 106. № A10, 21585–21598. 2001.*
 - *Mewaldt R.A., Looper M.D., Cohen C.M.S., Haggerty D.K., Labrador A.W., Leske R.A., Mason G.M., Mazur J.E., von Rosenvinge T.T.* Energy spectra, composition, and other properties of Ground-Level Events during solar cycle 23 // *Space Sci. Rev. V. 171. P. 97–120. 2012.*
 - *Miroshnichenko L.I.* Solar cosmic rays. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. 480 p. 2001.
 - *Miroshnichenko L.I.* Radiation hazard in space. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. 238 p. 2003.
 - *Miroshnichenko L.I.* Solar cosmic rays in the system of solar-terrestrial relations (Review) // *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys. (Special Issue of ISROSES Proc.). V. 70. P. 450–466. 2008.*
 - *Miroshnichenko L.I., de Koning C.A., Pérez-Enríquez R.* Large solar event of September 29, 1989: Ten years after (Review) // *Space Sci. Rev. V. 91. P. 615–715. 2000.*
 - *Miroshnichenko L.I., Perez-Peraza J.* Astrophysical aspects in the studies of solar cosmic rays (Invited Review) // *Int. J. Mod. Phys. A (IJMPA). V. 23. № 1. P. 1–141. 2008.*
 - *Miroshnichenko L.I., Gan W.Q.* Particle acceleration and gamma-rays in solar flares: Recent observations and new modeling // *Adv. Space Res. V. 50. P. 736–756. 2012.*
 - *Miroshnichenko L.I., Nymmik R.A.* Extreme fluxes in Solar Energetic Particle events: Methodical and physical limitations // *Radiation Measurements (in press). 2013.*
 - *Miyasaka H., Makishima K., Takahashi E. et al.* The solar event on 20 January 2005 observed with the Tibet YBJ Neutron Monitor Observatory // *Proc. 29th Int. Cosmic Ray Conf., Pune, India. V. 1. P. 241–244. 2005.*
 - *Moraal H., McCracken K.G.* The Time Structure of Ground Level Enhancements in solar cycle 23 // *Space Sci. Rev. V. 171. P. 85–95. 2012.*
 - *Nagashima K., Sakakibara S., Morishita I.* Quiescence of GLE-producible solar proton eruptions during the transition phase of heliomagnetic polarity reversal near the solar activity-maximum period // *J. Geomagn. Geoelectr. V. 43. № 8. P. 685–689. 1991.*
 - *Nemzek R.J., Belian R.D., Cayton T.E., Reeves G.D.* The October 22, 1989, solar cosmic ray event measured at geosynchronous orbit // *J. Geophys. Res. V. 99. № A3. P. 4221–4226. 1994.*

- *Nitta N.V., Liu Y., DeRosa M.L., Nightingale R.W.* What are special about Ground-Level Events? Flares, CMEs, active regions and magnetic field connection // *Space Sci. Rev.* V. 171. P. 61–83. 2012.
- *Perez-Peraza J., Gallegos-Cruz A., Vashenyuk E.V., Miroshnichenko L.I., Balabin Yu.V.* Impulsive, stochastic, and shock wave acceleration of relativistic protons in large solar events of 1989 September 29, 2000 July 14, 2003 October 28, and 2005 January 20 // *Astrophys. J.* V. 695. № 2. P. 865–873. 2009.
- *Perez-Peraza J., Velasco-Herrera V., Zapotitla J., Miroshnichenko L.I., Vashenyuk E.V., Libin I.Ya.* Classification of GLEs as a function of their spectral content for prognostic goals // *Proc. 32nd Int. Cosmic Ray Conf., Beijing, China.* V. 10. P. 149–152. 2011.
- *Podgorny I.M., Balabin Yu.V., Podgorny A.I., Vashenyuk E.V.* Spectrum of solar flare protons // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 72. P. 988–991. 2010.
- *Poirier J., D'Andrea C.* Ground level muons in coincidence with the solar flare of 15 April 2001 // *J. Geophys. Res.* V. 107. № A11. P. 1376. 2002.
- *Pomerantz M.A., Duggal S.P.* The Sun and cosmic rays // *Rev. Geophys. Space Phys.* V. 12. № 3. P. 343–361. 1974.
- *Quack M., Kallenrode M.-B., von König M., Künzi K., Burrows J., Heber B., Wolff E.* Ground level events and consequences for stratospheric chemistry // *Proc. 27th Int. Cosmic Ray Conf. Hamburg, Germany.* V. 10. P. 4023–4026. 2001.
- *Reames D.V.* Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere // *Space Sci. Rev.* V. 90. P. 413–491. 1999.
- *Ryan J.M., Lockwood J.A., Debrunner H.* Solar energetic particles // *Space Sci. Rev.* V. 93. P. 35–53. 2000.
- *Sakura K.* Physics of solar cosmic rays // Tokyo: Tokyo University Press. 428 p. 1974.
- *Schindler S.M., Kearney P.D.* Evidence for very high-energy solar particle production // *Proc. 13th Int. Cosmic Ray Conf., Denver, Co., USA.* V. 2. P. 1554–1559. 1973.
- *Shea M.A., Smart D.F.* Possible evidence for a rigidity-dependent release of relativistic protons from the solar corona // *Space Sci. Rev.* V. 32. № 1/2. P. 251–271. 1982.
- *Shea M.A., Smart D.F.* Unusual intensity-time profiles of ground-level solar proton events / *High Energy Solar Physics.* Eds. R. Ramaty, N. Mandzhavidze and X.-M. Xua. AIP Conf. Proc. 374. New York: AIP. P. 131–139. 1996.
- *Shea M.A., Smart D.F.* Dual acceleration and/or release of relativistic solar cosmic rays // *Proc. 25th Int. Cosmic Ray Conf., Durban, South Africa.* V. 1. P. 129–132. 1997.
- *Shea M.A., Smart D.F.* Space Weather and the Ground-Level Solar Proton Events of the 23rd Solar Cycle // *Space Sci. Rev.* V. 171. P. 161–188. 2012.
- *Simpson J.A.* Astrophysical phenomena discovered by cosmic rays and solar flare Ground Level Events: Early years // *Proc. 21st Int. Cosmic Ray Conf. Invited and Highlight Papers, Miscellaneous. Adelaide, Australia.* V. 12. P. 187–195. 1990.
- *Smart D.F., Shea M.A.* Solar proton events during the past three solar cycles // *J. Spacecraft Rockets.* V. 26. № 6. P. 403–415. 1989.
- *Struminsky A., Belov A.* Neutron monitor sensitivity to primary protons below 3 GV derived from data of Ground Level Events // *Proc. 25th Int. Cosmic Ray Conf. Durban, South Africa.* V. 1. P. 201–204. 1997.
- *Swinson D.B., Shea M.A.* The September 29, 1989 ground-level event observed at high rigidity // *Geophys. Res. Lett.* V. 17. P. 1073–1075. 1990.
- *Timashkov D.A., Balabin Yu.V., Borog V.V., Kompaniets K.G., Petrukhin A.A., Room D.A., Vashenyuk E.V., Shutenko V.V., Yashin I.I.* Ground-Level Enhancement of December 13, 2006 in muon hodoscopes data // *Proc. 30th Int. Cosmic Ray Conf. (Merida, Mexico, 3–11 July 2007).* V. 1. P. 209–212. 2007.
- *Tonwar S. on behalf of the L3 Collaboration.* Variations in cosmic ray intensity observed with the L3 + Cosmics shower array detectors and the intense solar flare on 14 July 2000 // *Proc. 27th Int. Cosmic Ray Conf. Germany, Hamburg.* V. 8. P. 3375–3378. 2001.
- *Tylka A.J., Cohen C.M.S., Dietrich W.F., Lee M.A., MacLennan C.G., Mewaldt R.A., Ng C.K., Reames D.V.* Shock geometry, seed population, and the origin of variable elemental composition at high energies in large gradual solar particle events // *Astrophys. J.* V. 625. P. 474–495. 2005.
- *Valdes-Galicia J.F., Muraki Y., Watanabe K., Matsubara Y., Sako T., Gonzalez L.X., Musalem O., Hurtado A.* Solar neutron events as a tool to study particle acceleration at the Sun // *Adv. Space Res.* V. 43. P. 565–572. 2009.
- *Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B.* Relativistic solar cosmic ray dynamics in large ground level events // *Proc. 21st ECRS. Kosice, Slovakia, 9–12 September, 2008. Inst. of Experimental Phys., Slovak Academy of Sci.* P. 264–268. 2009a.
- *Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B.* Characteristics of relativistic solar cosmic rays from GLE modeling studies // *Proc. 31st Int. Cosmic Ray Conf., Łodz, Poland. Paper 1304.* 2009b.
- *Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B.* Features of relativistic solar proton spectra derived from GLE modeling // *Astrophys. Space Sci. Trans.* V. 7. P. 459–463. 2011.
- *Wang R.* Did the 2000 July 14 solar flare accelerate protons to ≥ 40 GeV? // *Astroparticle Physics.* V. 31. № 2. P. 149–155. 2009.
- *Webber W.R., Higbie P.R., McCracken K.G.* Production of the cosmogenic isotopes ^3H , ^7Be , ^{10}Be , and ^{36}Cl in the Earth's atmosphere by solar and galactic cosmic rays // *J. Geophys. Res.* V. 112. A10106. 2007.
- *Wilson B.G., Mathews T., Johnson R.H.* Intercomparison of neutron monitors during solar-flare increases // *Phys. Rev. Lett.* V. 18. № 16. P. 675–676. 1967.
- *Zank G.P., Rice W.K.M., Wu C.C.* Particle acceleration and coronal mass ejection driven shocks: A theoretical model // *J. Geophys. Res.* V. 105. № A11. P. 25,079–25,095. 2000.
- *Zhu F.R., Wang R.G., Tang Y.Q. et al.* Observation of the 2005 January 20 GLE event using Yangbajing Solar Neutron Telescope and Neutron Monitor // *High Energ. Phys. Nucl.* V. 31. № 4. P. 341–344. 2007.