

ОПЫТ КЛАССИФИКАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ СОБЫТИЙ.

I. КЛАССИФИКАЦИЯ ПО ЭНЕРГИЯМ ИЗЛОМА В СПЕКТРАХ ЭНЕРГИЧНЫХ ИОНОВ

Г. С. Мартиросян

1. ВВЕДЕНИЕ

Для уточнений моделей происхождения галактических космических лучей (ГКЛ), важную роль играет точное экспериментальное знание поведения их энергетического спектра от малых до сверхвысоких энергий. В этой проблематике особое место занимает область излома при энергиях $E_k = (2 \div 5) \cdot E^6$ Гэв, где спектр до излома $dJ/dE \sim E^{-(2.6 \div 2.8)}$ укучается и принимает вид $dJ/dE \sim E^{-(3.0 \div 3.2)}$. Излом в энергетическом спектре ГКЛ экспериментально установлен давно [1] и надежно [см. например 2, 3].

Модели происхождения ГКЛ от их источников требуют колоссальной мощности энерговыделения ($\sim 10^{39} \div 10^{41}$ эрг/сек) [4]. В нашей Галактике этому требованию удовлетворяют в первую очередь взрывы сверхновых звезд. Идея ускорения ГКЛ взрывами сверхновых была выдвинута Бааде и Цвики ещё в 1934г [5]. После взрыва сверхновой оболочка выброшенного вещества расширяется со скоростью $\sim (1 \div 2) \cdot 10^4$ км/с. Современные модели рассматривают возможности ускорения ГКЛ на ударных волнах в расширяющихся оболочках сверхновых [6, 7]. Несмотря на возможность широкого выбора параметров ударной волны, для максимальной энергии ускоренных ионов пока получается значение $E_{\max} \sim (10^5 \div 10^6) \cdot Z$ Гэв, где Z -заряд ионов. Хотя эта гипотеза в наши дни подтверждается несколькими косвенными свидетельствами [см. например 8, 9], однако пока нет удовлетворительно эффективного механизма ускорения.

В солнечной системе ускорителем ионов является Солнце. Во время мощных солнечных вспышек ионы ускоряются до энергий порядка десятки Гэв [10]. Энергия, выделяемая во время самых больших солнечных вспышек, составляет $\sim 10^{32} \div 10^{33}$ эрг. Она выделяется в течении $\sim 10^2 \div 10^3$ с, т.е. мощность энерговыделения подобных вспышек составляет $\sim 10^{30} \div 10^{31}$ эрг/с. Хотя по мощности солнечные вспышки на много

порядков слабее взрыва сверхновой , однако, с точки зрения ускорения ионов и там и там по всей вероятности качественно происходят одни и те же процессы. С этой точки зрения Солнце является природной лабораторией , где можно изучать проблемы происхождения ГКЛ.

Солнечные вспышки сопровождаются выбросами корональной массы (ВКМ), которые в межпланетном пространстве инициируют ударные волны, скорость которых достигает до 3000км/с [11]. Солнечные космические лучи (СКЛ) ускоряются как на Солнце – в процессе вспышки (импульсные события), так и на ударных волнах в межпланетном пространстве (постепенные события) [12, 13]. Ряд фактов свидетельствуют о том, что до релятивистских энергий солнечные ионы ускоряются на межпланетных ударных волнах [14].

Классификация событий на импульсные и постепенные дает возможность группировать солнечные события по месту и механизму ускорения. Однако каждое событие, даже внутри этих групп, не похоже на другие и индивидуально по многим экспериментально измеренным характеристикам. Целью данной работы является попытка выявить некие параметры, с помощью которых можно будет характеризовать каждое событие и классифицировать их в группы по этим параметрам. Для этой цели мы исследовали энергетические спектры ионов СКЛ постепенных событий 23-его цикла солнечной активности, а в качестве параметра классификации использовали значения энергии в точке излома спектра ионов.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА

2.1 ДАННЫЕ

Для получения энергетических спектров солнечных энергичных ионов нами были использованы данные спутниковых экспериментов GOES Pchann [15], ACE/ULEIS [16], ACE/SEPICA [17], ACE/SIS [18] и анализировали энергетические спектры ионов H, He, C, O и Fe. В эксперименте GOES Pchann регистрируются потоки протонов в семи энергетических интервалах от 0.6Мэв до 500Мэв. Подобные характеристики для He, C, O и Fe приведены в таблице 1.

Таблица 1. Энергетические характеристики ионов He, C, O и Fe, зарегистрированные в экспериментах ACE/ULEIS, ACE/SEPICA и ACE/SIS.

Эксперимент	He		C		O		Fe	
	Е Мэв/н	Чис. Интерв.	Е Мэв/н	Чис. Интерв.	Е Мэв/н	Чис. Интерв.	Е Мэв/н	Чис. Интерв.
ACE/ULEIS	0,063÷8,67	15	0,041÷14	9	0,04÷10,4	8	0,035÷3,07	9
ACE/SEPICA	0.4÷6	7	0.12÷11.7	6	0.43÷7.19	5	0.43÷3.07	4
ACE/SIS	3.4÷41.2	8	6.1÷76.3	8	7.1÷89.8	8	10.5÷167.7	8
ACE (общее)	0,063÷41,2	30	0,041÷76,3	23	0,04÷89,8	21	0,035÷167,7	21

Нами получены дифференциальные спектры ионов H, He, C, O и Fe для 23 событий с 19 февраля 1998г (начало данных ACE/ULEIS) до конца 2003г. Из известных не вошли в список события 2-05-1998г, 24-08-1998г и 14-07-2000г, из за отсутствия данных ACE/ULEIS. Список этих событий и их основные характеристики приведены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики анализированных событий .

Дата	GOES класс	Коорд. вспышки	Начало вспышки UT	Ударная ^{*)} волна UT	Скорость ВКМ, км/с	Скорость УВ, км/с
20-04-98	M1.4/?	S43W90	9:38	23апр.,17:14	1863	~450
6-05-98	X2/1N	S11W65	7:58	-	1099	-
30-09-98	M2/2N	N23W81	15:20	-	-	-
12-09-00	M1/2N	S17W09	11:31	15сен., 4:15	1550	~360
8-11-00	M7.4/3F	N10W77	22:42	10нояб.,6:01	1738	~900
24-11-00	X2/3B	N20W05	4:55	26нояб.,11:26	1245	~620
28-01-01	C4.7/SF	S31W17	19:45	31январь,7:36	916	~420
15-04-01	X14.4/2B	S20W85	13:19	17апр.,23:57	1199	~540
18-04-01	C2.2/2B	S20W120	2:11	21апр.,14:57	2465	~390
1-10-01	M9.1/?	S22W91	4:41	-	1405	-
24-09-01	X2.6/2B	S16E23	9:32	25 сен., 19:51	2402	~850

22-10-01	X1.2/2B	S18E16	17:44	25окт.,7:57	1336	~500
4-11-01	X1/3B	N06W18	16:03	6нояб.,1:20	1810	~700
22-11-01	M9.9/2N	S15W34	22:32	24нояб.,5:33	1437	~750
26-12-01	M7.1/1B	N08W54	4:32	29дек.,4:56	1446	~470
21-04-02	X1.5/1F	S14W84	0:43	23апр.,4:08	2393	~640
22-05-02	C5/?	S30W34	3:18	-	1557	-
24-08-02	X3.1/1F	S02W81	0:49	26авг.,10:20	1913	~420
28-10-03	X17.2/4B	S18E20	9:51	29окт.,6:00	2459	~1100
29-10-03	X10/2B	S15W02	20:37	?	2029	~1900
2-11-03	X8.3/2B	S14W56	17:03	4нояб.,5:53	2598	~700
4-11-03	X28/3B	S19W83	19:29	6нояб.,18:56	2657	~550
20-11-03	-	-	-	20нояб.,7:28	-	~650

) Время достижения ударной волны спутнику SOHO в UT.

2.2 ПОСТРОЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Использованная нами методика определения энергетических спектров имеет две особенности, отличающиеся от общепринятых подходов.

а. Обычно энергетический спектр ионов определяется по потокам, интегрированным по всему времени регистрации потока данного иона, либо, по потокам, интегрированным в широком временном интервале.

В отличие от общепринятой методики, для построения энергетического спектра мы взяли значения максимальных потоков для всех энергетических интервалов, используя часовые данные потоков. Этот подход обоснован тем, что максимальный поток более информативен относительно параметров области ускорения и межпланетной среды, через которую распространяются ускоренные частицы [19].

б. Спектры солнечных энергичных ионов обычно аппроксимируют единой функцией [см. например 20].,

$$dJ/dE \sim E^{-\sigma} \cdot e^{-E/E_0} \quad (1)$$

предложенной в работе [21], для описания спектра солнечных ионов, ускоренных на межпланетных ударных волнах. Здесь σ - единый показатель спектра, E_0 - энергия, в области которой меняется поведение спектра (e-folding).

В нашем анализе для определения энергии излома мы спектры солнечных ионов аппроксимировали степенной функцией

$$dJ/dE \sim E^{-\gamma} \quad (2)$$

с помощью которой также описывается поведение энергетического спектра ГКЛ (γ - показатель спектра).

Эти функции один и тот же спектр описывают с помощью отличающихся друг от друга параметров ($\sigma \neq \gamma$, $E_0 \neq$ энергии излома по (2)). Для иллюстрации на рис. 1 приведен спектр протонов от солнечного события 18 апреля 2001г, построенный по максимальным потокам.

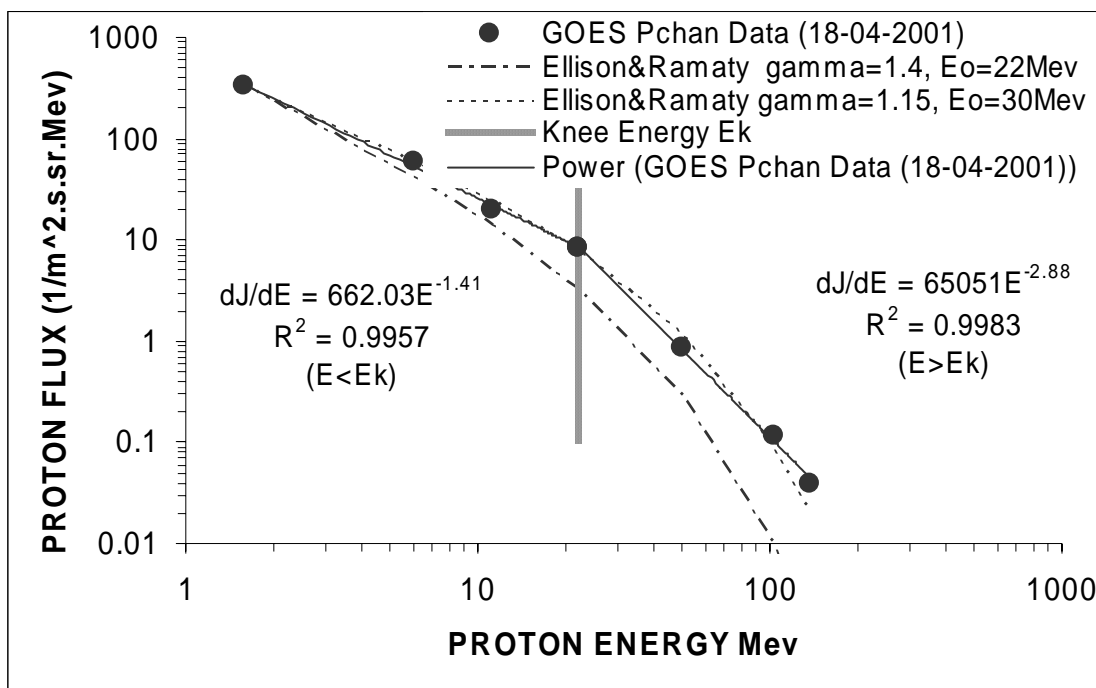


Рис. 1. Спектр протонов 18 апреля 2001г, аппроксимированный по (1) и (2). На рисунке слева и справа от графика соответственно приведены аппроксимационные степенные функции спектра протонов до и после излома. В скобках соответствующие коэффициенты корреляций.

Наилучшая аппроксимация спектра протонов по формуле (1) получается при едином показателе $\sigma = 1,15$ и $E_0 = 30$ Мэв. Аппроксимация этого же спектра степенной функцией показывает, что спектр имеет излом в точке $E = 22$ Мэв и показатели спектра до и после излома соответственно имеют значения $\gamma_1 = 1,41$ и $\gamma_2 = 2,88$. Следовательно,

понятия e-folding спектра и излом спектра (в том понимании, как принято в спектре ГКЛ) не идентичны.

3. ИЗЛОМ В СПЕКТРАХ ИОНОВ СКЛ

Мы определили максимальные потоки по временным профилям потоков Н, Не, С, О, Fe и по этим максимальным потокам получили энергетические спектры этих ионов в зависимости от полной кинетической энергии ионов. Получены спектры указанных ионов для каждого события из таблицы 2. Далее, полученные спектры аппроксимировались степенной функцией (2) и определялась полная кинетическая энергия в месте излома E_k , показатели спектра до и после излома γ_1 и γ_2 .

В данной работе мы анализировали зависимость энергии излома от атомного номера ионов A . На рис. 2 приведено распределение значений $E_k(A_i)/E_k(P)$ ($i = \text{He, C, O, Fe}$) в зависимости от атомного номера для всех 23 событий. $E_k(A_i)$ – полная кинетическая энергия точки излома спектра ионов типа i , $E_k(P)$ – полная кинетическая энергия точки излома спектра протонов.

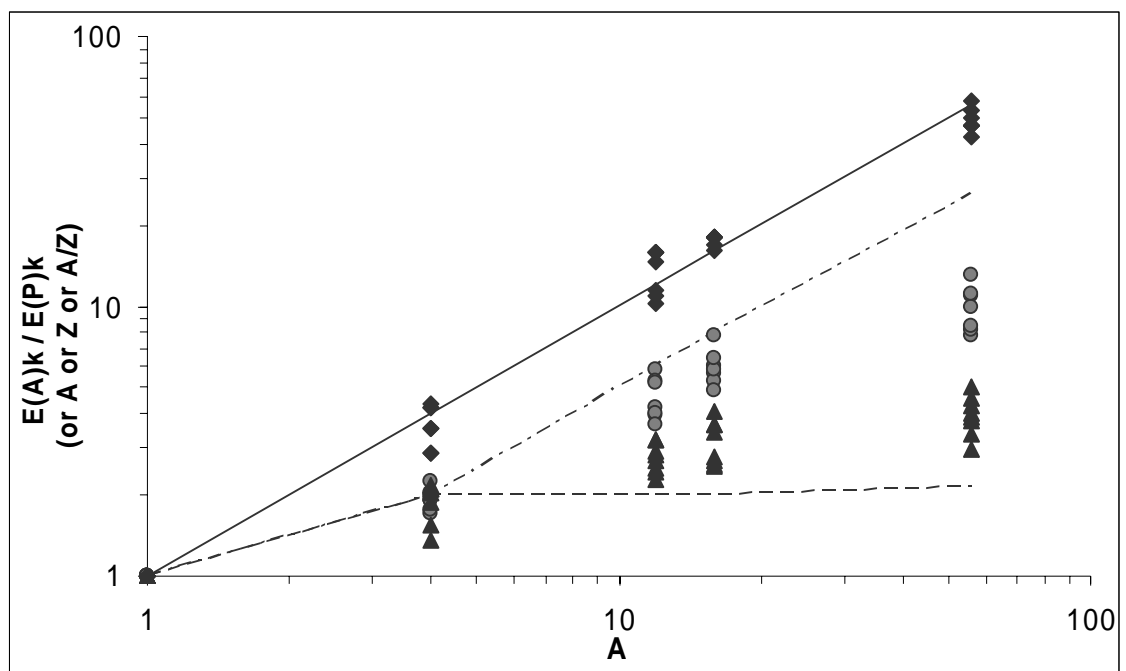


Рис. 2. Распределение $E_k(A)/E_k(P)$ в зависимости от атомного номера A .

— соответствует зависимости $E_k(A)/E_k(P)=A$, - · - · - соответствует зависимости $E_k(A)/E_k(P)=Z$, _ _ _ соответствует зависимости $E_k(A)/E_k(P)=A/Z$, где Z заряд соответствующего ядра.

Как видно из рис. 2, значения $E_k(A)/E_k(P)$ распределяются внутри 3-х групп (ромбики, круги, треугольники) и расстояние между группами увеличивается с увеличением атомного числа ионов, т.е. наблюдается три разные зависимости $E_k(A)/E_k(P)$ отношения от атомного числа ионов. Анализ значений $E_k(A)/E_k(P)$ внутри каждой группы показывает, что значения внутри первой (верхней) группы (7 событий) близки к атомным числам ионов, значения второй (средней) группы (7 событий) по всей вероятности пропорциональны заряду ионов, и наконец значения третьей (нижней) группы (9 событий) пропорциональны величине A/Q_A . Для иллюстрации, на рис. 3 приведены спектры ионов H, He, C, O, Fe для событий 28 октября 2003г, 22 мая 2002г и 11 ноября 2001г, соответственно принадлежащих к первой, второй и третьей группам.

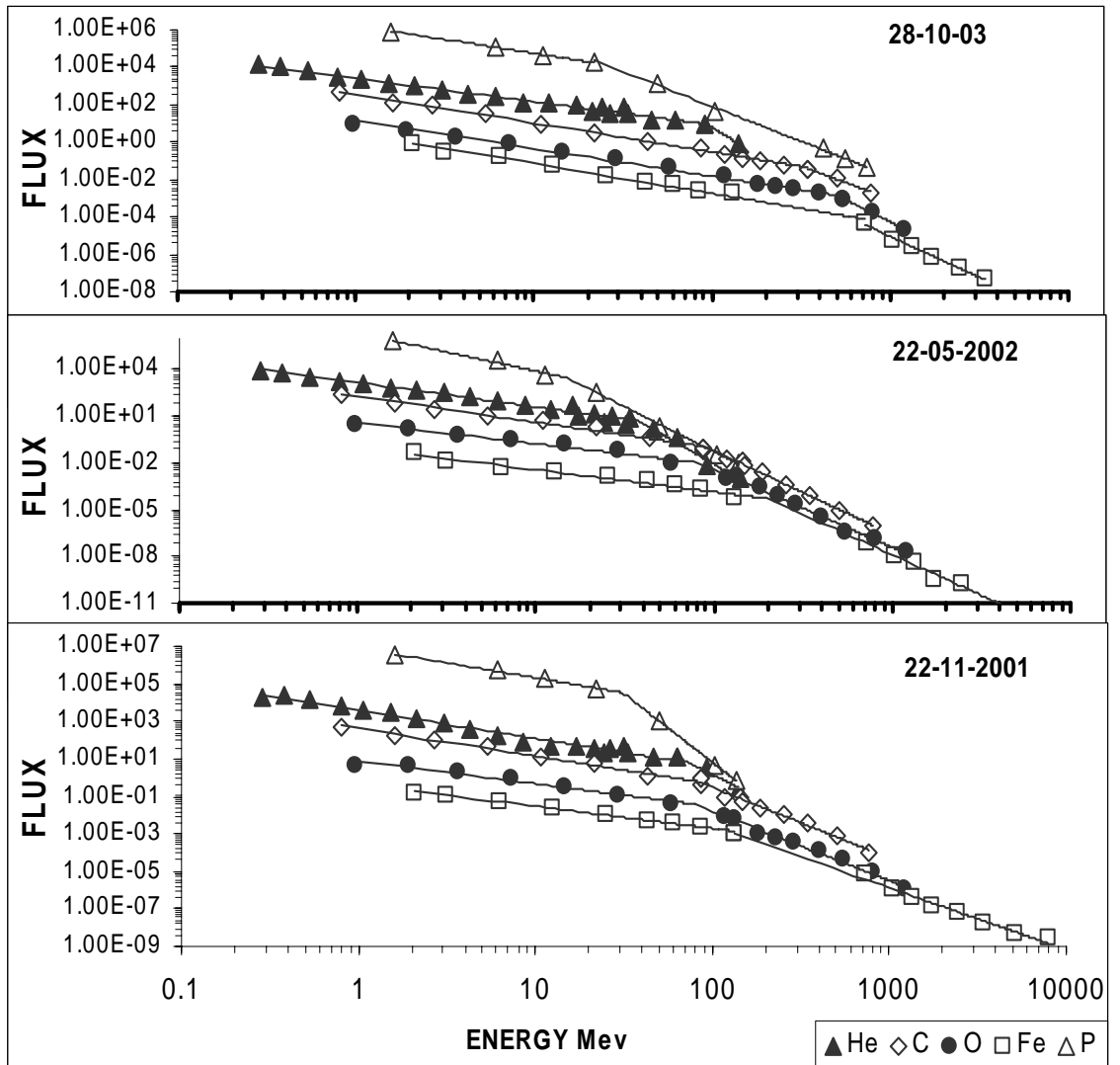


Рис. 3 Спектры ионов H, He, C, O, Fe для 28 октября 2003г ($E_k(A)/E_k(P)=A$), 22 мая 2002г ($E_k(A)/E_k(P)=Q_A$) и 22 ноября 2001г ($E_k(A)/E_k(P)=A/Q_A$).

Усредненные значения $E_k(A)/E_k(P)$ отношений со статистическими ошибками внутри каждой группы и для каждого типа ионов приведены в таблице 3.

Таблица 3. Усредненные значения $E_k(A)/E_k(P)$ отношений

№ Группы	He	C	O	Fe	Тип зависимости
I	$3,63 \pm 0,6$	$13,29 \pm 2,8$	$17,63 \pm 2$	$47,15 \pm 7,9$	A
II	$1,94 \pm 0,2$	$4,58 \pm 0,8$	$5,95 \pm 0,9$	$9,9 \pm 1,1$	$Q_A - 1$
III	$1,9 \pm 0,3$	$2,7 \pm 0,4$	$3,2 \pm 0,5$	$4,3 \pm 0,9$	A/Q_A
$\langle Q_A \rangle^*$	~ 2	$\sim 4,5$	$\sim 5,1$	$\sim 13,1$	

*) Соответствующие средние значения заряда ионов для этой группы.

Эти данные в графическом виде представлены на рис. 4, где на оси ординат для данных первой группы $E_k(A)/E_k(P)=A$, для второй группы $E_k(A)/E_k(P)=Q_A - 1$ и для третьей группы $E_k(A)/E_k(P)=A/Q_A$.

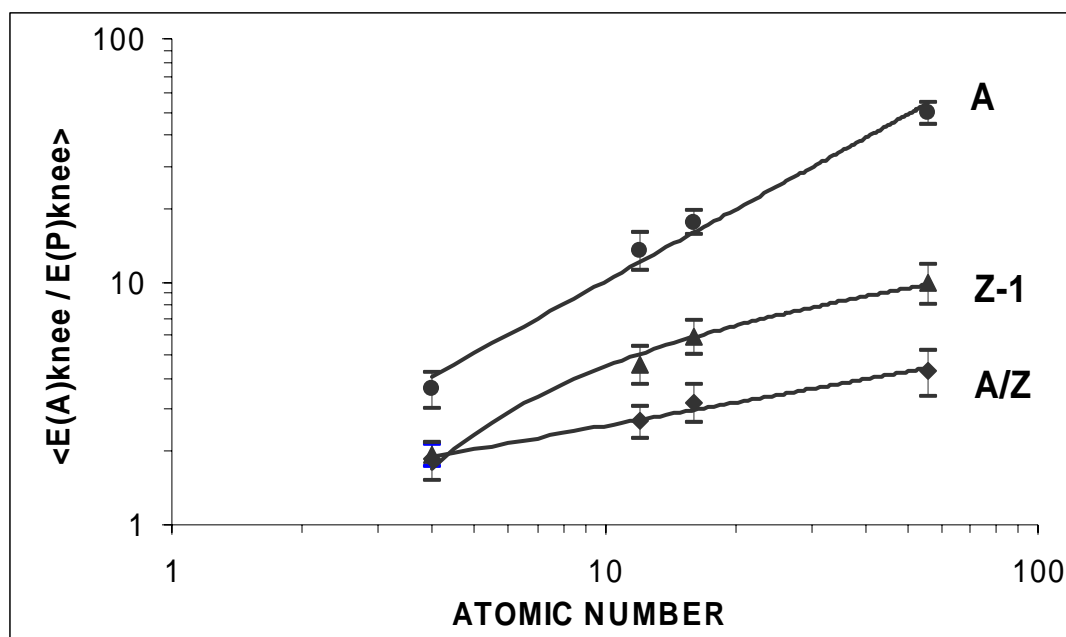


Рис. 4. Усредненные значения $E_k(A)/E_k(P)$ по группам и по типу ионов. Линиями представлены соответствующие аппроксимационные функции (детали смотри далее в тексте и в таблице 4).

Экспериментальные значения $E_k(A)/E_k(P)$ отношений первой и третьей групп хорошо аппроксимировались степенной функцией от атомного числа A. Данные третьей группы аппроксимировались логарифмической функцией. Ниже, в таблице 4,

приведены аппроксимационные формулы для трех групп данных. В скобках приведены соответствующие значения коэффициентов корреляций.

Таблица 4.

Группа	$E_k(A)/E_k(P)$ отношение	Зависимость Q_A от A
I	$=A (=M_A / M_P)$ (0.992)	-
II	$=Q_A - 1$ (0.991)	$3.05 \cdot \ln(A) - 2.55$
III	$=A/Q_A$ (0.985)	$A^{0.6}$

Эти эмпирические соотношения устанавливают взаимную связь между $E_k(A)/E_k(P)$ и зарядом и/или атомным номером ионов.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты обсудим отдельно для каждой группы.

4.1 ЗАВИСИМОСТЬ ЭНЕРГИИ ИЗЛОМА ОТ АТОМНОГО НОМЕРА (А-ЗАВИСИМОСТЬ)

А-зависимость энергии излома в спектре ионов наблюдается для событий **6-05-98**, **30-09-98**, **8-11-00**, **24-09-01**, **4-11-01**, **21-04-02** и **28-10-03** (жирными отмечены события, во время которых наблюдались наземные возрастания потока СКЛ).

Суть А-зависимости состоит в том, что значения $E_k(A)/E_k(P)$ отношения численно равняются атомному числу A

$$E_k(A)/E_k(P) = M_A/M_P = A \quad (3)$$

Из соотношения (3), где в левой части отношение полных кинетических энергий ионов и протонов, следует, что при размерности энергия на нуклон изломы спектров всех ионов наблюдается при одних и тех же энергиях. На рис. 5 представлены усредненные по семи событиям энергии излома спектра ионов Н, Не, С, О, Fe для группы А-зависимости.

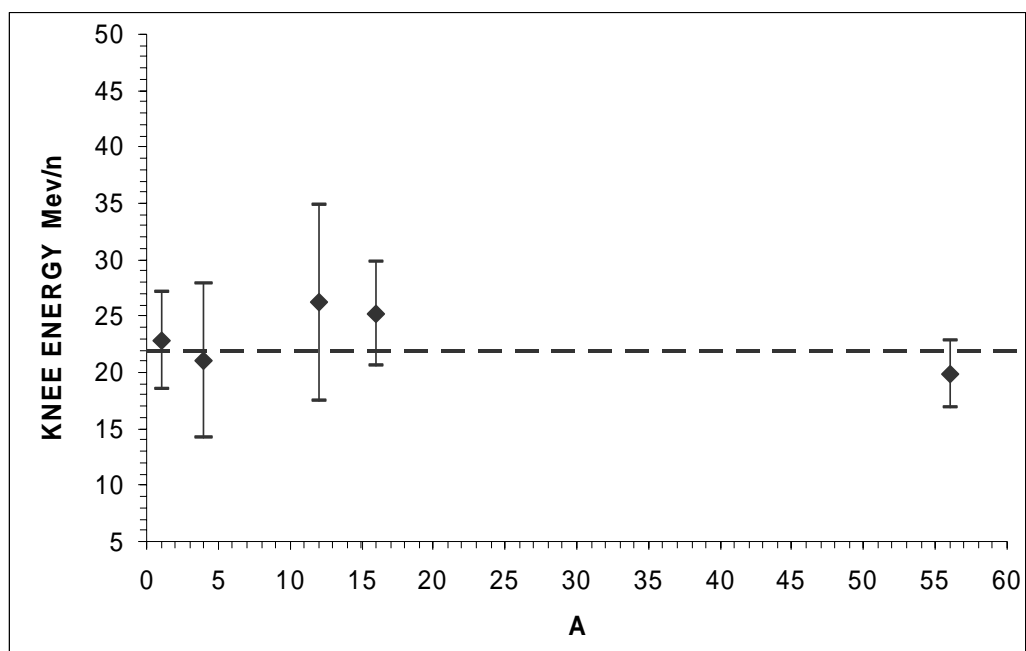


Рис. 5. Усредненные энергии (Мэв/н) излома спектра ионов H, He, C, O, Fe для событий группы A-зависимости. Пунктирная линия соответствует энергии 22Мэв/н.

Как видно, энергии излома разных ионов распределены вокруг значения ~ 22 Мэв/н и согласно соотношению (3)

$$E_k(A)/A = E_k(P) \approx 22 \text{ Мэв/н}$$

Современные модели ускорения ионов на ударных волнах не предсказывают такой зависимости [см. например 6]. Идея существования такой зависимости между энергиями ионов и протонов в области излома в спектре ГКЛ была высказана в работах [22, 23]. Суть идеи в том, что в спектре первичных ГКЛ излом отсутствует и в наземных измерениях появляется как следствие изменения характера взаимодействия первичных частиц в атмосфере Земли при энергиях $E_0/A \geq 3 \cdot 10^6$ Гэв/н.

Однако полученные нами результаты указывают, что A-зависимость скорее свойство конкретного механизма ускорения, либо следствие определенной комбинации параметров области ускорения и распространения.

4.2 ЗАВИСИМОСТЬ ЭНЕРГИИ ИЗЛОМА ОТ ЗАРЯДА (Q-ЗАВИСИМОСТЬ)

В группу Q-зависимости вошли события 20-04-98, 12-09-00, 24-11-00, 22-05-02, 29-10-03, 4-11-03, 20-11-03. Данные этой группы устанавливают эмпирические связи между $E_k(A)/E_k(P)$, Q_A и A.

В отличие от A -зависимости, для этой группы событий излом спектра ионов наблюдается в широком энергетическом диапазоне (например, для протонов $6 \leq E_k(P) \leq 36$ МэВ, а для ионов Fe $60 \leq E_k(Fe) \leq 400$ МэВ). В этом случае естественно предположение, что между энергией излома протонов и ионов существует определенная функциональная связь. Для выявления этой связи мы воспользовались графиками рассеяний (scatter plot) между $E_k(A)$ и $E_k(P)$. Для иллюстрации, график рассеяния между $E_k(Fe)$ и $E_k(P)$ приводится на рисунке 6.

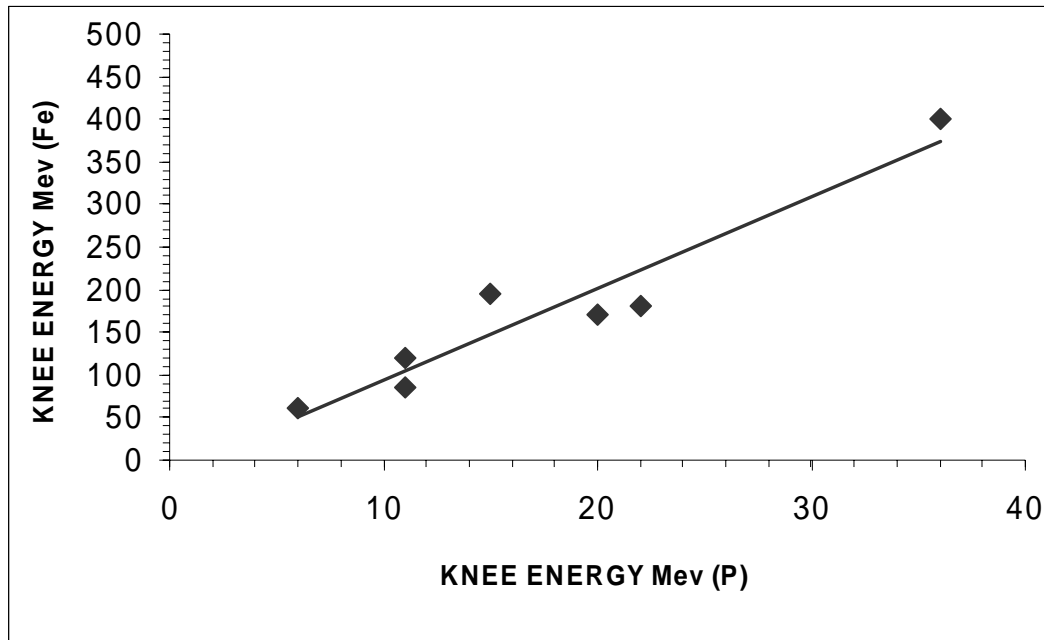


Рис. 6. График рассеяния между $E_k(Fe)$ и $E_k(P)$ для 7 событий группы Q -зависимости.

Исследование зависимости $E_k(A)$ от $E_k(P)$ для ионов He, C, O, Fe и обобщение результатов нас привели к заключению, что между $E_k(A)$ и $E_k(P)$ существует следующая линейная связь

$$E_k(A)/E_k(P) = Q_A - 1 \quad (4)$$

Важно так же отметить, что $E_k(A)/E_k(P)$ отношение (следовательно и $Q_A - 1$) от атомного числа A зависит как линейная функция от логарифма атомного числа

$$E_k(A)/E_k(P) = a \cdot \ln A - b \quad (5)$$

И наконец, из (4) и (5) следует, что через экспериментальные значения $E_k(A)/E_k(P)$ отношения можно определить значения заряда ионов

$$Q_A = 1 + E_k(A)/E_k(P) \quad \text{или} \quad Q_A = a \cdot \ln A - b + 1 \quad (6)$$

Идея зависимости энергии излома спектра ионов от заряда популярна среди специалистов астрофизики ГКЛ. Она тесно связана с проблемой формирования излома в спектре ГКЛ и определения массового состава первичного космического излучения [24, 25, 26]. Теоретические модели ускорения на ударных волнах между $E_k(A)$ и $E_k(P)$ предполагают связь $E_k(A)/E_k(P) = Q_A$. В работе [27], при рассмотрении возможности ускорения ГКЛ в оболочках сверхновых, указывается, что при определенных условиях между максимальными энергиями ионов и протонов должна существовать связь типа (4)

$$E_{\max}(A) = \xi \cdot Q_A \cdot E_{\max}(P) \quad (7)$$

где коэффициент пропорциональности $\xi = 1$ при релятивистских энергиях и $\xi = 1/2$, при нерелятивистских энергиях, E_{\max} – максимальное значение полной кинетической энергии вследствие ускорения.

Исследуя зависимость (7), авторы работы [28] пришли к выводу, что экспериментальные данные СКЛ требуют несколько модифицированный вид этой зависимости и предлагали зависимость

$$E_0(A) = E_0(P) \cdot (Q_A/A)^\delta \quad (8)$$

где $E_0(A)$ и $E_0(P)$ соответственно e-folding энергии на нуклон для иона с массовым числом A и протона. По данным [28] значения показателя δ меняются от события к событию. Например, для события 20-04-98 эти значения в интервале $0.8 \leq \delta \leq 1.3$, а для события 25-08-98 в интервале $1.9 \leq \delta \leq 2.8$.

Комбинируя данные экспериментов ACE/SIS, Wind/EPACT/LEMT и IMP8/GME, авторы работы [28] по интегральным по времени спектрам определили энергии e-folding и с помощью (8) определили заряды ионов C, N, O, Ne, Mg, Si, S и Fe для событий 20-04-98 и 25-08-98 (интервал e-folding энергий $\sim 2 \div 60$ Мэв/н). Там же авторы полученные значения Q_A сравнивают со значениями зарядов этих ионов, определенных в эксперименте ACE/SEPICA (интервал энергий $\sim 0,2 \div 1$ Мэв/н) [29].

Для сравнения наших результатов с данными [28] и [29] мы для события 20-04-98 $E_k(A)/E_k(P)$ отношение определили для ионов He, C, N, O, Ne, Mg, Si и Fe по данным ACE/SEPICA и ACE/SIS. По результатам нашего анализа значения энергий излома

спектров указанных ионов попали в интервал $\sim 45 \div 400 \text{ МэВ}$ ($\sim 7 \div 16 \text{ МэВ/н}$). Сравнение результатов приведено на рис. 5.

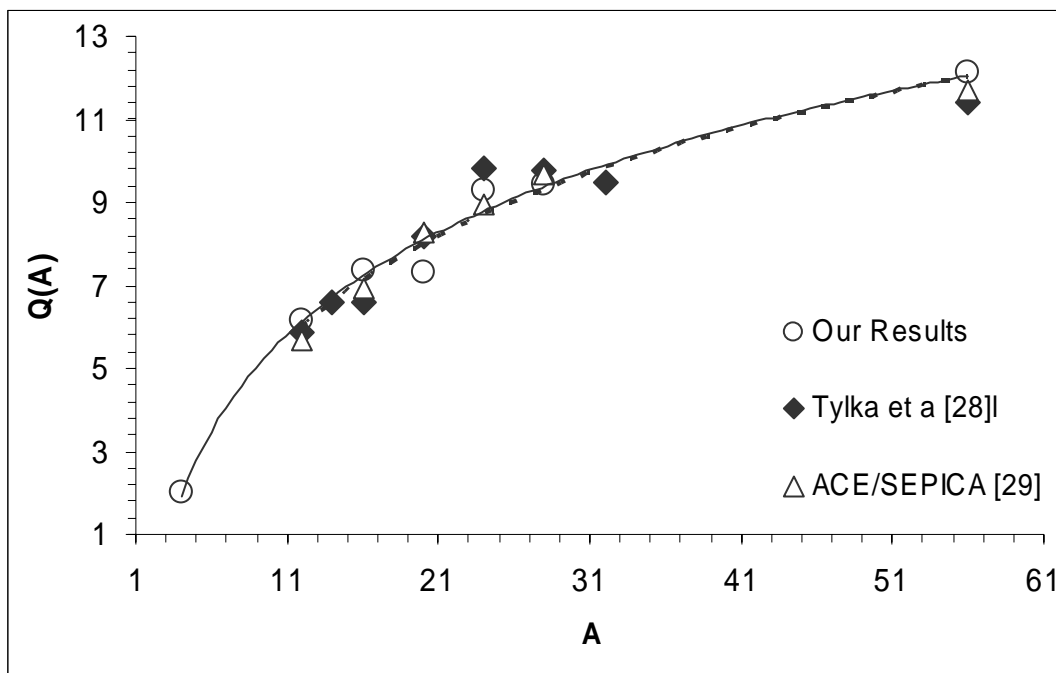


Рис. 7. Сравнение наших результатов по определению заряда ионов с данными [28] и [29] для события 20 апреля 1998г. Ё

Наши данные и экспериментальные данные ACE/SEPICA аппроксимировали выражением (6)

$$Q_A = 3.92 \cdot \ln A - 3.76 \quad (\text{ACE/SEPICA})$$

$$Q_A = 3.84 \cdot \ln A - 3.39 \quad (\text{наши данные})$$

Соответствующие значения коэффициента корреляции составили 0.976 и 0.986.

Как видно из рисунка 7 и вышеприведенных аппроксимационных выражений, значения заряда ионов, определенные с помощью выражения (6) и для интервала $\sim 7 \div 16 \text{ МэВ/н}$, практически совпадают с данными ACE/SEPICA ($\sim 0,2 \div 1 \text{ МэВ/н}$).

Следовательно, для каждого события, принадлежащей к группе Q-зависимости, значение отношения полной кинетической энергии излома спектра ионов к энергии излома спектра протонов позволяет с хорошей точностью определить зарядовое состояние ионов в области энергии излома.

События, принадлежащие к группе Q-зависимости, проявляют еще одну интересную особенность. Для всех событий этой группы ускорение ионов происходила в системе взаимодействующих ВКМ [30].

4.3 ЗАВИСИМОСТЬ ЭНЕРГИИ ИЗЛОМА ОТ ОТНОШЕНИЯ АТОМНОГО ЧИСЛА К ЗАРЯДУ ИОНА (A/Q-ЗАВИСИМОСТЬ)

В группу A/Q-зависимости вошли события 28-01-2001, **15-04-2001**, **18-04-2001**, 1-10-2001, 22-10-2001, 22-11-2001, **26-12-2001**, **24-08-2002**, 2-11-2003. Данные этой группы устанавливают следующие эмпирические связи между $E_k(A)/E_k(P)$, A и Q_A :

1. Значения $E_k(A)/E_k(P)$ отношения численно равняются отношению атомного числа A к заряду иона Q_A

$$E_k(A)/E_k(P) = A/Q_A \quad (9)$$

2. $E_k(A)/E_k(P)$ отношение от атомного числа A зависит как степенная функция от A

$$E_k(A)/E_k(P) = 1.06 \cdot A^{0.37} \quad (10)$$

3. Из (9) и (10) следует, что

$$Q_A = \chi \cdot A^{0.63} \quad (11)$$

где коэффициент пропорциональности $\chi \sim 1$.

Как следует из (9), по данным III группы тоже можно определить средние значения заряда ионов

$$\langle Q_A \rangle = A \cdot E_k(P)/E_k(A) \quad \text{либо} \quad \langle Q_A \rangle = \chi \cdot A^{1-\beta} \quad (12)$$

Если для событий, принадлежащих к группе Q-зависимости, зависимость значений заряда ионов от атомного номера A имеет логарифмический вид, то, как видно из (12), для событий группы A/Q-зависимости эта зависимость степенная. На рис. 8 для сравнения приведены зависимости значений заряда от атомного номера для событий 20-04-1998г (Q-зависимость) и 26-12-2001г (A/Q-зависимость).

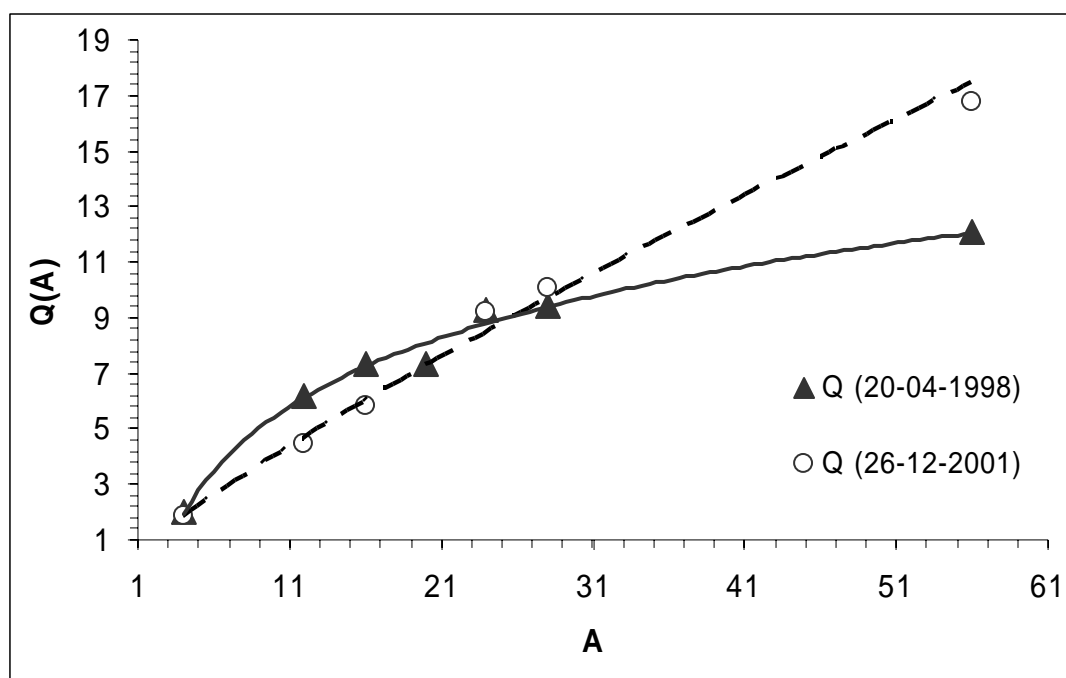


Рис. 8. Зависимости значений заряда ионов от атомного номера для событий 20-04-1998г (Q-зависимость) и 26-12-2001г (A/Q-зависимость).

Что касается теоретических моделей ускорения, то в них отмечается, что при распространении ударной волны в плазме, где примесные ионы ионизованы не полностью, спектр ускоренных частиц будет обогащаться ядрами тяжелых элементов [31, 32, 27]. Также отмечается, что поскольку пробег рассеяния быстрых частиц является растущей функцией жесткости, ионы с большим отношением A/Q_A будут дальше проникать в область предфронта, вследствие чего их спектр как функция энергии на нуклон будет более пологим. Оба эффекта наблюдаются в эксперименте [см. например 33].

5. ВЫВОДЫ

Тот факт, что приведенные зависимости между энергиями излома спектра наблюдаются для максимальных потоков ионов и протонов, по всей вероятности говорит о том, что события группируются в соответствии с тремя разными механизмами ускорения и распространения ионов. С этой точки зрения обобщение результатов и основные выводы мы сделаем после анализа других характеристических параметров

(разность показателей спектра ионов до и после излома, время нарастания потока ионов до максимума, распространенность ионов и т.д.).

Важным результатом данного этапа анализа является ещё тот факт, что выявлена возможность определения заряда в области энергий излома через значения $E_k(A)/E_k(P)$ отношения.

Благодарности

Коллективам спутниковых экспериментов GOES, ACE/ULEIS, ACE/SEPICA, ACE/SIS, SOHO/LASCO за экспериментальные данные, выставленные в Internet; А. Чилингаряну, за полезные замечания. Работа выполнена в рамках гранта А1058 и гранта тематического финансирования РА 1465.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куликов Г. В. Христиансен Г.Б., Ж. Эксперим. и теор.физ., 35, 635 (1959)
2. Amenomori M., Cao Z., Dai B.Z. et al., Astrophys. J., 461, 408 (1996)
3. Horandel J.R., Astropart. Phys., v. 19, p. 193, 2003; preprint astro-ph/0210453
4. Гинзбург В.Л., Сыроватский С.И. Происхождение космических лучей, Москва, 1963
5. Baade W., Zwicky F., Nat. Acad. Sci. USA, v. 20, p. 259, 1934; Phys. Rev., v. 46, p. 76, 1934
6. Jones F.C., Ellison D.C., Space Sci. Rev., v. 58, p. 259, 1991
7. Бережко У.Г., Елшин В.К., Ксенофонтов Л.Т., Ж. Эксперим. и теор.физ., т. 109, вып. 1, ст. 3, 1996
8. Koyama K., Petre R., Gotthelf E.V. et al, Nature, v. 378, p. 255, 1995
9. Drury L.O'C., Ellison D.E., Aharonian F.A. et al, Space Sci. Rev., v. 99, p. 329, 2001
10. Reames D.V., Space Sci. Rev., v. 90, p. 413, 1999
11. SOHO/LASCO CME Catalog. (http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)
12. Kahler S.W., Reames D.V, Astrophys. J., v. 584, p. 1063, 2003
13. Cliver E.W., Kahler S.W., Reames D.V, Astrophys. J., v. 605, p. 902, 2003
14. Kahler S., Astrophys. J., v. 428, p. 837, 1994
15. GOES. (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/>)
16. ACE/ULEIS (http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/lvl2DATA_ULEIS.html)

17. ACE/SEPICA (http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/lvl2DATA_SEPICA.html)
18. ACE/SIS (http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/lvl2DATA_SIS.html)
19. Паркер Е.Н., Динамические процессы в межпланетной среде, Мир, 1965
20. Tylka A.J., Cohen C.M.S., Dietrich C.G. et al, Proc. 27th ICRC, Hamburg, 2001
21. Ellison D.C., Ramaty R., *Astrophys. J.*, v. 298, p. 400, 1985
22. Martirosyan H.S., *Proc. Nat. Acad. Sci. of Armenia*, v. 31, №36, p. 163, 1996 (in rus.)
23. Nikolsky S.I., *Nucl. Phys. B (Proc. Supl.)*, v. 75A, p. 217, 1999
24. Haungs A., *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.*, v. 29, p. 809, 2003
25. Kalmykov N.N., *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.*, v. 29, p. 801, 2003
26. Chilingarian A., Gharagozyan G., Hovsepyan G. et al, *Astrophys. J.*, v. 603, p. L29, 2004
27. Ellison D.C., Drury L., Meyer J-P., *Astrophys. J.*, v. 487, p. 197, 1997
28. Tylka A.J., Bobrg P.R., McGuire R.E. et al, *AIP Conference Proc.*, v. 528, p. 147, 2000
29. Klecker B., Popecki M.A., Mobius E. et al, Proc. 26th ICRC, Salt Lake City, 1999
30. Gopalswamy N., Yashiro S., Michalek G. et al, *Astrophys. J.*, v. 572, L107, 2002
31. Ellison D.C., Jones F.C., Eichler D., *J. Geophys.*, v. 50, p. 110, 1981
32. Ellison D.C., *J. Geophys. Res.*, v. 90, p. 29, 1985
33. Reames D.V., Tylka A.J., *Astrophys. J.*, v. 575, p. L37, 2002