

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

---

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМЕНИ Д.В.СКОБЕЛЬЦЫНА

Д.Г. Баранов, Ю.Ф. Гагарин, В.А. Дергачев, Р.А. Ныммик, М.И. Панасюк

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГИЧНЫХ  
ЧАСТИЦ И МЕТОДИКА ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИИ**

Препринт НИИЯФ МГУ № 2011-11/875

Москва, 2011

Д.Г. Баранов, Ю.Ф. Гагарин, В.А. Дергачев, Р.А. Ныммик, М.И. Панасюк  
e-mail: nymmik@srd.sinp.msu.ru

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ И МЕТОДИКА ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Препринт НИИЯФ МГУ № 2011-11/875

### Аннотация

Изучаются надежность и достоверность результатов измерений потоков протонов и тяжелых ионов солнечных энергичных частиц, выполненных при помощи различных экспериментальных методик, а также способы описания полученных данных при помощи разных модельных функций – энергетических спектров. Анализируются и сравниваются результаты измерения потоков тяжелых ионов солнечных космических лучей (СКЛ), выполненных методикой твердотельных трековых детекторов (ТТД) в экспериментах «Астро» (апрель 1981 г. – станция «Салют-6») и «Платан-3» (1988 – 1989 гг. - станция «Мир») с результатами экспериментов VLET и CRT, выполненных на ИСЗ IMP-8. Особое внимание обращено на анализ результатов, полученных приборами SIS и ULEIS (космический аппарат ACE), а также результатов измерений потоков ионов гелия прибором EPEAD на спутниках GOES. Мы обсуждаем и проблему аппроксимации экспериментальных данных о потоках СКЛ различными функциями от энергии (импульса, скорости) частиц. Такая аппроксимация часто является основой для интерпретации результатов измерений. Выявлены многочисленные систематические ошибки, присущие результатам измерения потоков частиц СКЛ, выполненных разными приборами на искусственных спутниках Земли (ИСЗ) и других космических аппаратах.

**D.G. Baranov, Y.F. Gagarin, V.A. Dergachev, R.A. Nymmik, M.I. Panasyuk**

## THE RESULTS OF SOLAR ENERGETIC PARTICLES FLOW MEASUREMENTS AND METHODS OF THEIR INTERPRETATION

Preprint MSU SINP N 2011-11/875

### Abstract

**Abstract** - We study the reliability and validity of the measurements of fluxes of protons and heavy ions of solar energetic particles, made using different experimental techniques and methods for describing the data obtained with different model functions of the energy spectra. The results of measurements of heavy ion fluxes of solar cosmic rays (SCR), made by the method of solid-state track detectors (HDT) in the experiments "Astro" (April 1981 - the station "Salyut-6") and "Platane-3" (1988 - 1989. - station "Mir") have been analyzed and compared with the experimental results VLET and CRT, performed on the satellite IMP-8. Particular attention was paid to the analysis of the results obtained by instruments SIS and ULEIS (ACE spacecraft), and the results of measurements of the fluxes of helium ions in the unit EPEAD satellite GOES. We discuss the problem of approximation of experimental data on the fluxes of SCR by various functions of the energy (pulse rate) of the particles. This approximation is often the basis for the interpretation of measurement results. Numerous biases inherent in measurements of the particle fluxes of SCR, made by different instruments on the Earth's satellites (AES) and other space vehicles Analyzes have been identified.

Д.Г. Баранов, Ю.Ф. Гагарин, В.А. Дергачев, Р.А. Ныммик, М.И. Панасюк  
© НИИЯФ МГУ, 2011, <http://www.sinp.msu.ru>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Надежность экспериментальных данных о потоках высокоэнергетических частиц СКЛ и их интерпретация (в частности, аппроксимация энергетических спектров) – проблемы, привлекающие внимание исследователей. Обычно обращают внимание только на статистические ошибки измерений и игнорируют тот факт, что данные могут быть искажены систематическими погрешностями. Такие ситуации имеют место вследствие как сложных радиационных условий в космосе, так и известных свойств (недостатков) аппаратуры. Вследствие этого в каждом случае требуется тщательный анализ, как достоверности полученных экспериментальных данных, так и корректности используемых методов их отображения и обобщения.

Мы уже обращали внимание на эти проблемы в случае измерений потоков высокоэнергетичных солнечных протонов [1-4], выполненных при помощи электронной аппаратуры. В этих работах мы указали на систематические ошибки, свойственные некоторым электронным методам регистрации (инструмент CPME на спутнике IMP-8 и инструменты Telescope и Dome на спутниках GOES), а также их отдельным измерительным каналам. Как правило, систематические ошибки, относящиеся к результатам измерения в отдельных каналах приборов, можно выделить, используя данные энергетических спектров не одиночных событий, а некоторой совокупности событий СКЛ. Например, в работах [1, 3, 4], мы сравнили пиковые потоки протонов в 13-ти событиях СКЛ, которые были одновременно измерены на спутниках GOES, IMP, Метеор, на стратостатах и при помощи нейтронных мониторов. Было установлено, что потоки протонов СКЛ, измеренные в высокоэнергетических каналах регистрации инструмента CPME (IMP-8) при высоких энергиях завышены (при энергии 400 МэВ более чем в 10 раз [1, 3, 4]). Кроме того, в работе [4] было показано, что поправки к измеренным потокам протонов в высокоэнергетических каналах прибора DOME на борту спутника GOES, вводятся авторами эксперимента в противоположном направлении, чем было ими же заявлено в [5]. В работе [4] было также показано что, если анализ множества событий СКЛ является хорошим способом для диагностики надежности прибора, то привлечение для такого анализа данных только одного единственного события СКЛ [5] может привести к ошибочным выводам.

Ранние эксперименты по изучению потоков высокоэнергетичных частиц в космосе выполнялись при помощи ядерных эмульсий и твердотельных трековых детекторов (ТТД). На наш взгляд, по сравнению с электронными методами регистрации, эти, так называемые, визуальные методики весьма надежны. Главным недостатком визуальных методик является их интегральный характер – в них суммируются потоки частицы за все время экспозиции. Однако, проведение экспериментов с помощью ТТД в различных фазах солнечной активности (СА)

позволяет разделить зарегистрированные потоки по их происхождению. В минимуме СА обычно регистрируются ядра галактических космических лучей (ГКЛ) и ионы аномального компонента. В максимуме СА, при наличии событий СКЛ, флюенс которых существенно превышает фон ядер ГКЛ за все время экспозиции, основной вклад вносят потоки частиц СКЛ.

Целью данной работы является: а) анализ проблем, связанных с достоверностью результатов измерения потоков СКЛ разными методами и приборами; б) сравнение способов аппроксимации экспериментальных данных различными функциями.

В разделе 2 настоящей работы рассматривается вид энергетических спектров частиц СКЛ и анализируется вопрос оптимальной аппроксимации экспериментальных данных.

В разделе 3 проводится сопоставление различных методов измерений потоков энергичных частиц СКЛ и обсуждаются их недостатки и преимущества.

Раздел 4 посвящен рассмотрению погрешностей измерений, связанных со систематическими ошибками отдельных измерительных каналов электронной аппаратуры.

В разделе 5 обсуждается вопрос аппроксимации энергетических спектров тяжелых ионов СКЛ.

## 2. ВИД ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ЧАСТИЦ СКЛ.

Важной проблемой при анализе и интерпретации результатов измерений является выбор оптимальной функции для аппроксимации экспериментальных данных потоков СКЛ. В первых работах для описания спектров протонов и гелия широко использовались функции - экспоненты по энергии или жесткости (см., например, [6]). Однако позже, при исследовании потоков тяжелых ионов СКЛ [7], было показано, что выше некоторой пороговой величины энергии (порядка 10-30 МэВ/нуклон) спектры частиц СКЛ суть функции степенные. Это же свойство для спектров протонов было продемонстрировано в работах [1, 3, 4], где было показано, что, начиная с 30 МэВ вплоть до 10 ГэВ, спектры протонов точнее всего описываются степенными функциями от жесткости (или импульса). Альтернативный способ был предложен Эллисоном и Рамати [8], которые описывали энергетические спектры протонов в событиях СКЛ степенной функцией от энергии, умноженной на экспоненту:

$$\frac{dF}{dE} = CE^{-\gamma E} \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right). \quad (1)$$

Здесь величина  $E_0$  имеет, согласно результатам работы [9], величину порядка 10 МэВ.

Такой вид аппроксимации, в которой степенной спектр «заваливается» с ростом энергии следует из теории ускорения частиц на плоской ударной волне из-за целого ряда эффектов,

однако то, что такое ограничение спектра может быть описано экспонентой, является предположением авторов [8].

Следует отметить, что формула (1) противоречит результатам работы [7]. Это противоречие не находило объяснения до настоящего времени. В работах [4, 10, 11] для проверки гипотезы [8] мы сравнили аппроксимацию функцией (1) с аппроксимацией степенными функциями (2), используя при этом исходные экспериментальные данные самой работы [8].

$$F^{(z)}(E) \cdot dE = C^{(z)} \left( \frac{pc}{239} \right)^{-\gamma^{(z)}} \frac{dE}{\beta}, \quad (2)$$

где  $pc = \sqrt{E(E + 2M_0c^2)}$ ,  $E$  – кинетическая энергия иона в МэВ/нуклон;  $M_0c^2 = 938$  МэВ – энергия покоя нуклона;  $\beta = v/c$  – скорость частицы относительно скорости света. Величина  $pc = 239$  МэВ/нуклон соответствует  $E = 30$  МэВ/нуклон.

При высоких энергиях ( $E \geq 30$  МэВ/нуклон)  $\gamma^{(z)} = \gamma_0^{(z)}$  спектр является чисто степенным, а при

$$E < 30 \text{ МэВ/нуклон} \quad \gamma^{(z)} = \gamma_0^{(z)} \left( \frac{E}{30} \right)^{\alpha^{(z)}} \quad (3)$$

спектр постепенно становится жестче. Отметим, что величина параметра  $\alpha^{(z)}$  зависит от типа частиц, т.е. зависимость (3) формализует эффекты, продемонстрированные в работе [7].

В работах [4, 10, 11] мы показали, что исходные экспериментальные данные работы [8] описываются степенной функцией (2) и (3) точнее, чем формулой (1). Однако в настоящее время формулу (1) стали часто применять и для описания энергетических спектров тяжелых ионов СКЛ (см. например, [9, 12]). Между тем, наш анализ показывает, что во всех случаях, когда экспериментальные результаты известны в достаточно широком интервале энергии (до 100 МэВ/нуклон и выше), при  $E > 30$  МэВ/нуклон энергетические спектры как флюенсов, так и пиковых потоков СКЛ описываются степенными функциями от жесткости протонов [4, 9, 10] (или в случае тяжелых ионов – степенными функциями импульса частицы на нуклон). Отметим, что этот вывод не относится к энергетическим спектрам частиц в фиксированный момент времени!

Выбор аппроксимирующей функции часто проводят, используя результаты измерений, выполненных в относительно узких интервалах энергии. Учитывая при этом недостаточную точность измерений (в частности, статистические и систематические ошибки), имеющиеся данные можно с одинаковым успехом аппроксимировать разными функциями. Обойти эти трудности можно разными способами.

Во-первых, привлекая данные прибора, выполнявшего измерения потоков частиц тех же событий СКЛ в дополнительном энергетическом диапазоне.

Во-вторых, используя в анализе данные разных приборов (даже в случае близости энергетических диапазонов измерения).

В-третьих, проверив достоверность экспериментальных данных, определив свойственные данному прибору систематические ошибки.

В-четвертых, повысив точность экспериментальных данных путем логарифмического усреднения величин потоков, выполненных в одних и тех же каналах измерения для большого количества событий СКЛ (см. ниже, формула (4)).

### 3. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПОТОКОВ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ

Прежде всего, мы продемонстрируем высокую степень достоверности визуальных методов измерения потоков высокоэнергичных частиц в космическом пространстве, которые в настоящее время применяются все реже.

В 1972 году на спутнике Интеркосмос-6 был выполнен эксперимент с большой камерой ядерной фотоэмульсии [13]. В этом эксперименте был измерен поток электронов ультравысоких энергии  $E \geq 10^{12}$  эВ [14]. С помощью электронных методов такой результат был достигнут только в настоящее время, т.е. приблизительно на 30 лет позже [15]. При этом примечательна методическая чистота теперь уже исторического эксперимента: пространственное разрешение частиц в электронных каскадах меньше 1 мкм, что на 3 порядка величины лучше, чем в современных электронных приборах (разрешение хуже 1 см).

Применение визуальных методов регистрации встречает две трудности. Во-первых, необходимо возвращать детекторы из космического пространства на Землю. Во-вторых, необходимо учитывать, что потоки частиц с жесткостью менее 15 ГВ, проникающие на околоземные орбиты космических аппаратов, искажены влиянием изменчивой во времени магнитосферой Земли. Однако степень этого искажения можно учесть расчетным путем. В работе [16] были разработаны, а в работе [17] уточнены алгоритмы, позволяющие провести пересчеты данных измерений на орбите внутри магнитосферы к условиям вне магнитосферы Земли с учетом геомагнитных возмущений ( $K_p$  – индексы) и суточных вариаций магнитосферы (местное время).

Эффективность разработанных алгоритмов была, в частности, доказана при анализе результатов эксперимента «Астро-1» [18], выполненного на станции «Салют-6» 16-21 мая 1981 г. в условиях возмущенной магнитосферы Земли. Происхождение зарегистрированных в этом эксперименте потоков легких ядер (ионов) С, N, О долгое время не находило объяснения.

Только после разработки алгоритмов [16], было показано [19], что зарегистрированные частицы являются ионами от события СКЛ 16 мая 1981 г., проникшими на орбиту станции (рис. 1). Подтверждением этого вывода является то, что в области энергии  $\sim 10$  МэВ/нуклон поток ионов кислорода, пересчитанный к условиям вне магнитосферы Земли, совпадает с потоком этих же частиц, зарегистрированных прибором VLET на спутнике IMP-8 [20].

Большой интерес представляют результаты измерений флюенса ионов железа от крупных событий СКЛ в 1988-1989 гг., выполненных с высокой статистической точностью на орбитальной станции «Мир» (эксперимент «Платан-3» с камерой ТТД [21]) и в тот же самый период электронными приборами VLET и CRT на ИСЗ IMP-8 [22]. Результаты, полученные на орбите станции «Мир» в условиях возмущенной магнитосферы, были пересчитаны к условиям межпланетного пространства [20]. Полученные данные в своем окончательном виде (с использованием алгоритмов [17]) отображены на рис. 2. Видно, что потоки, измеренные двумя разными электронными приборами на ИСЗ IMP-8 [22], при одинаковых энергиях около 50 МэВ/нуклон, не согласуются друг с другом. Примечательно что, с одной стороны, результаты наших измерений, пересчитанные к условиям вне магнитосферы Земли, как и в случае эксперимента «Астро-1» (рис. 1), совпадают с данными прибора VLET. С другой стороны, наши результаты в области энергий меньших 200 МэВ/нуклон расходятся с данными, полученными прибором CRT. Таким образом, результаты двух наших независимых экспериментов, выполненные ТТД на орбите обитаемых станции, позволяют сделать заключение о достоверности данных прибора VLET и о систематических ошибках в работе прибора CRT на спутнике IMP-8 вне магнитосферы Земли.

Следует подчеркнуть, что потоки тяжелых ионов за пределами магнитосферы, вычисленные на основе экспериментальных данных экспериментов «Астро-1» [18] и «Платан-3» [21], хорошо описываются предложенной нами степенной функцией от импульса частиц на нуклон (см. формулы (2) и (3) и рис. 1 и 2).

Следует обратить внимание на один недостаток электронных устройств – это некоторая условность энергетических интервалов регистрации частиц. В некоторых случаях параметры каналов измерения после длительного периода измерений пересматриваются авторами эксперимента и их корректируют (в случае данных, полученных прибором DOME на спутнике GOES [23]), что приводит к необходимости пересмотра и исправления «задним числом» величин потоков протонов для большого количества уже зарегистрированных событий СКЛ. Данный пример показывает, что экспериментаторы не всегда уверены в точности расчетов и наземных калибровок своих характеристик электронных приборов. Отметим, что калибровка прибора на ускорителе не избавляет от систематических погрешностей, которые вызваны

естественным космическим фоном посторонних частиц и вторичными взаимодействиями, происходящими в детекторах в ходе космического полета. В экспериментах с твердотельными детекторами подобные ситуации исключаются. О ненадежности электронной аппаратуры свидетельствуют также, время от времени, появляющиеся пропуски информации от прибора или от его отдельных каналов.

Мы уже отметили [1, 3, 4], что в случае регистрации одних и тех же потоков протонов солнечных событий на спутниках GOES и IMP-8 их результаты при  $E > 100$  МэВ различаются в среднем более чем в 10 раз. Подобные же отличия данных имеют место и в случае регистрации потоков ионов гелия СКЛ прибором EPAD на спутниках GOES и прибором SIS на аппарате ACE [24]. На рис. 3 мы представляем данные о логарифмически усредненных флюенсах гелия в 54 событиях СКЛ, измеренных указанными приборами. Логарифмическое усреднение флюенса в канале  $k$  для данного сорта частиц производится по следующей формуле:

$$\langle F_k \rangle = 10^f, \quad (4)$$

где:  $f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log(F_{k,i})$ ,  $i$ - номер события,  $n = 54$  – количество выбранных событий СКЛ, а  $F_{k,i}$  – величина флюенса  $i$ -того события в канале  $k$ .

Как следует из данных, приведенных на рис. 3, полученных на аппарате ACE и спутниках GOES, потоки и энергетические спектры одной и той же совокупности событий СКЛ заметно отличаются. При энергиях меньше 20 МэВ/нуклон флюенсы, измеренные на ACE, в среднем в 2-3 раза больше, чем измеренные на спутнике GOES. Заметно отличаются и наклоны спектров при высокой энергии. В случае описания энергетических спектров формулами (2) и (3), спектральные индексы имеют величину  $\gamma = 9.1$  (ACE) и  $\gamma = 6.6$  (GOES). В такой ситуации трудно судить об истинных параметрах энергетических спектров.

#### 4. НАДЕЖНОСТЬ ДАННЫХ В ОТДЕЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛАХ

Проблема надежности данных каждого из измерительных каналов приборов является важной проблемой физики и моделирования СКЛ. Ложные данные даже от отдельного канала искажают энергетические спектры и их параметры, и поэтому влияют на выводы относительно ускорения высокоэнергичных частиц Солнцем и процессов распространения этих частиц в межпланетном пространстве, затрудняют разработку расчетных моделей СКЛ.

В настоящей работе мы провели анализ данных измерения флюенсов тяжелых ионов СКЛ прибором SIS на ACE. На рис. 4а и 4б приведены логарифмически усредненные (4) флюенсы

ионов гелия, кислорода, магния и серы для средних (рис. 4а) и больших (рис. 4б) по величине событий СКЛ. Если в случае 15-ти событий средней величины усредненные флюенсы частиц (кроме гелия) хорошо ложатся на аппроксимации (2), то в случае 5-ти больших событий (8 ноября 2000 г.; 4 ноября 2001 г.; 28 и 29 октября 2003 г. и 17 ноября 2005 г.) в первых трех каналах измерения наблюдаются систематические отклонения от таких аппроксимаций.

Привлечем для анализа отмеченных эффектов данные другого прибора ULEIS, также установленного на спутнике ACE. На рис. 5 приведены величины флюенсов ионов гелия, вычисленные логарифмическим усреднением флюенсов в каналах приборов SIS и ULEIS для вышеперечисленных больших событий СКЛ. Используем при этом аппроксимации данных прибора SIS формулами (2) и (3), вычисленные в одном случае по данным каналов 1, 4, 5, 6, 7 и в другом случае - каналов 2, 3, 4, 5, 6, 7. Из полученного результата (рис.5) следует, что нерегулярность в экспериментальных данных обусловлена нелинейностью счета частиц во втором, третьем, и, возможно, также в четвертом каналах регистрации прибора SIS. Данные первого канала не искажены, ибо фактически совпадают с данными прибора ULEIS в соответствующем интервале энергии. Наряду с анализом данных прибора SIS можно также сделать вывод о том, что в больших событиях СКЛ имеет место завышение данных по потокам ионов гелия в двух старших измерительных каналах прибора ULEIS.

Данные, приведенные на рис. 6, подтверждают вывод о занижении счета в каналах 2 и 3 прибора SIS и в случае кислорода, хотя и в значительно меньшей степени, чем в случае гелия. Можно заметить, что искажения данных относятся к одним и тем же каналам измерения и только к тем частицам, потоки которых велики. Величина эффекта не зависит от величины энергии и увеличивается с увеличением величины потока. Эффект, который мы демонстрируем, есть иногда встречающаяся нелинейность каналов измерений при высоком темпе счета. Специфическим является то, что эффект не проявляется в данных измерения первого канала.

В случае измерения потоков частиц в больших событиях СКЛ возникают и другие эффекты. Иногда в таких событиях в высокоэнергетических каналах наблюдается большой разброс данных, который выходит за рамки статистических отклонений и который вряд ли можно приписать физическим явлениям.

Так, на рис. 7 можно видеть выброс величин флюенса ионов железа в 7-ом измерительном канале SIS в событии 28 октября 2003 г. Значение потока в 5 раз больше, чем следует ожидать согласно данным, полученным в каналах 5, 6 и 8. Как следует из анализа скорости счета частиц, это отклонение не может быть вызвано статистическими флуктуациями. На этом же рисунке приведены данные о флюенсе ионов кремния (Si), величина которого резко падает в последнем - 8-ом канале измерения (по сравнению с плавным изменением потока при более низких

энергиях). На рисунке виден и дисбаланс данных потоков кремния, измеренных в 1, 2 и 3 каналах, который мы анализировали выше. Примечательно, что на логарифмически усредненных флюенсах всех 54 событий, зарегистрированных прибором SIS, никаких нерегулярностей не наблюдается.

Как следует из приведенных примеров, даже в таком современном электронном измерительном приборе, как SIS, возникают проблемы надежности измеренных данных. И каждый раз, прежде чем делать выводы относительно физических процессов, приводящих к генерации высокоэнергичных частиц (особенно в одиночных событиях СКЛ), необходим тщательный всесторонний анализ результатов измерения.

## 5. АППРОКСИМАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Получение большого набора данных на аппарате ACE открывает широкие возможности для анализа источников и механизмов ускорения энергичных тяжелых ионов СКЛ. Для аппроксимации полученных данных используют две разные, в широком энергетическом интервале взаимоисключающие формы энергетических спектров (1) и (2), (3). Мы уже показали, что спектры (1) из [8] не являются наилучшими ни в случае данных исходной статьи [8], ни для большого ряда данных по спектрам флюенсов и пиковых потоков, которые мы анализировали в наших работах. Ознакомившись с анализом экспериментальных данных, выполненных в работах [11, 12, 25] мы не можем согласиться с авторами этих работ во всех случаях, когда потоки частиц измерены в достаточно широком энергетическом диапазоне, потому что аппроксимация, содержащая экспоненту (1), описывает экспериментальные данные при высоких энергиях заметно хуже, чем степенная функция (2), (3).

В качестве примера рассмотрим данные, показанные на рис. 8 (это те же самые данные, которые приведены в работе [11] на рис. 8б). Здесь экспериментальные данные из сайта ACE представляют собой флюенсы ионов железа, измеренные прибором SIS для солнечного события 21 апреля 2002 г. в течение 72 часов с начала события (белые кружочки). Заметим, что данные каналов 7 и 8 на рис. 8б в оригинальной работе [11] отсутствуют и авторы демонстрируют аппроксимацию (1) только по данным 1-6 каналов. На рис. 8 эта аппроксимация также показана (кривая 3). На нашем рисунке, кроме данных о флюенсах частиц СКЛ, приведены также данные о фоне частиц ГКЛ, вычисленные как по международной модели [2] (звездочки), так и по данным самого прибора SIS для 72 часов измерения в период времени, предшествовавший солнечному событию (ступенчатая линия с черными кружочками). Из приведенных данных следует, что флюенс, измеренный в 8-ом канале прибора, действительно обусловлен частицами ГКЛ. Однако флюенс, измеренный в 7-ом канале (на рис. 8 данные 7-го канала обведены большим кружком) в 7 раз выше фонового потока ГКЛ. Поэтому игнорировать данные этого

канала недопустимо. Если учитывать данные канала 7, то аппроксимация степенной функцией (линия 1 на рис. 8) точнее аппроксимации (1) (линия 2, рис. 8), для которой в этом случае  $E_0 > 50$  МэВ/нуклон (формула 1). Эта величина противоречит выводам работ [11, 12], согласно которым величина  $E_0$  для потоков железа СКЛ имеет величину, меньшую 10 МэВ/нуклон.

Здесь уместно отметить трудности анализа энергетических спектров тяжелых ионов СКЛ на таком длинном отрезке времени, как 72 часа. Потоки высокоэнергичных тяжелых частиц СКЛ малы и регистрируются, в основном, около максимума события в течение десятка часов; фоновые же частицы ГКЛ регистрируются в течение всего выбранного для анализа интервала. На рис. 8 приведены данные о флюенсах, зарегистрированных прибором SIS в течение первых 24 часов (белые треугольники), а также фоновые потоки частиц для такого более короткого интервала времени. Отношение зарегистрированного в 7-ом канале потока частиц СКЛ к фону в этом случае в 1,5 раза больше, чем в случае использования 72 часового интервала. Поэтому для анализа потоков тяжелых частиц СКЛ в области высоких энергий следует ограничиться, по возможности, коротким отрезком времени, для которого отношение потока частиц СКЛ к фоновому потоку максимально.

Отметим, что мы проанализировали флюенсы C, N, O, Ne, Mg, Si, S и Fe для 54 больших постепенных СКЛ событий, измеренных прибором SIS на ACE в 24-х часовых интервалах времени. В подавляющем числе случаев, мы не обнаружили данных о потоках частиц, которые могли быть точнее аппроксимированы экспонентой (1), чем степенной функцией (2), (3). При этом, чем мягче энергетический спектр частиц в событии, тем короче энергетический интервал, в котором величина потока частиц СКЛ выше фона частиц СКЛ. В таких случаях сокращается количество каналов при энергии выше 30 МэВ/нуклон, где спектр является степенным. И, как следует из данных рис. 8, появляется возможность аппроксимировать потоки формулой (1). Поэтому выводы о форме спектров в виде (1) связаны, прежде всего, с недостаточной шириной интервала энергии в области энергий выше 30 МэВ/нуклон, в котором выполняются измерения. При достаточно широком интервале измеряемых энергий выше 30 МэВ/нуклон, представлять спектр в виде (1) становится невозможным. Поэтому все выводы о природе СКЛ, базирующиеся на форме энергетического спектра (1), объясняются, не столько физикой явления, сколько недостатками методики измерений и методологии аппроксимации полученных спектров.

## ВЫВОДЫ

Достоверность данных о потоках частиц солнечных космических лучей и их аппроксимации различными функциями – важная проблема физики Солнца и ближнего межпланетного пространства, где указанные потоки частиц генерируются и распространяются. Для решения

этих проблем недостаточно измерять потоки частиц в некоторых ограниченных интервалах энергии. В этом случае из-за ограниченной точности измерения (определяемой статическими и систематическими ошибками) одна и та же совокупность потоков частиц может быть приблизительно с одинаковой точностью описана принципиально разными функциями, описывающие разные физические процессы.

Однако и при ограниченных интервалах энергии регистрируемых частиц существуют способы анализа экспериментальных данных, позволяющие оценить достоверность результатов измерений. Это может быть достигнуто разными методами.

Во-первых, привлечением измерений разных приборов к определению потоков частиц одних и тех же солнечных событий. Часто такой подход позволяет определить систематические ошибки, присущие к результатам измерения теми или иными приборами.

Во-вторых, привлечением к анализу одновременно данных целого множества событий СКЛ, логарифмически усредняя потоки частиц, относящиеся к одним и тем же каналам измерения.

В третьих, кроме заранее выбранной функции – формы энергетического спектра, используя в анализе и альтернативные аппроксимации.

В настоящей работе мы обращаем внимание на то, что по сравнению с ранее используемыми методами определения потоков частиц СКЛ – ядерными фотоэмульсиями и твердотельными трековыми детекторами, современным электронным методам присущи значительные систематические погрешности (хотя они и позволяют провести более детальный и простой анализ потоков частиц СКЛ). Такие систематические ошибки, относящиеся к результатам измерения потоков протонов на спутниках серии GOES и IMP-8, мы подробно рассмотрели в работах [1 - 4]. В данной работе мы показываем, что подобные же систематические ошибки присущи и приборам, используемым для измерения потоков тяжелых ионов СКЛ.

Из ранних экспериментальных данных мы установили систематические отклонения от истинных величин (до 4 раз) данных прибора CRT IMP-8 по измерению потоков железа при энергиях *порядка* десятков МэВ/нуклон. Мы показали, что при регистрации тяжелых ионов, потоки которых высоки (мощные события СКЛ, легкие ионы – гелий и кислород) в данных, полученных в некоторых низкоэнергетических каналах прибора SIS на аппарате ACE имеет место эффект нелинейности. Также искажается величина потоков, измеряемых высокоэнергетическими каналами прибора ULEIS, установленного на том же спутнике.

Показано, что аппроксимация экспериментальных данных формулой Эллисона-Рамати (1) не согласуется с видом энергетических спектров тяжелых ионов СКЛ в области энергии, выше нескольких десятков МэВ/нуклон.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают свою благодарность Л.И.Мирошниченко за ряд полезных замечаний по содержанию настоящей работы. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (ГК № 07.514.11.4020) и РФФИ (грант 09-02-00083-а).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mottl D., Nymmik R., and Sladkova A.* Spectra of solar energetic protons derived from statistical analysis of experimental data on large set of events // Proc. 27<sup>th</sup> ICRC 2001. P. 3183.
2. *Mottl D. and Nymmik R.* Errors in the particle flux measurement data relevant to solar energetic particle spectra // Adv. Space Res. 2003. V. 32(11). P. 2349.
3. *Моттль Д.А., Ныммик Р.А.* Энергетические спектры солнечных космических лучей: действительность и мифы. // Изв. АН России, сер. физ. 2003 том 67(2). С. 466-469.
4. *Mottl D. and Nymmik R.* The issues of reliability of solar energetic proton flux databases and models // Adv. Space Res. 2007. V. 39. P. 1355.
5. *Zwickl R.D.* Energetic particle correction algorithm, in:  
<http://goes.ngdc.noaa.gov/data/avg/readme.txt>
6. *Smart D.F., Shea M.A.* Comment on the use of GOES solar proton data and spectra in solar dose calculation // Radiation Measurements. 1999. V. 30. P. 327.
6. *Freier P.S. and Webber W.R.* Exponential rigidity spectrums for solar-flare cosmic rays // JGR. 1963. V. 68 № 6. P. 1605.
7. *Price P.B., Chan J.H., Crawford H.J and Sullivan J.H.* Systematic of heavy ion enhancement in solar flares // Proc. 13<sup>th</sup> ICRC.. P. 1479, 1973
8. *Ellison D.C. and Ramaty R.* Shock acceleration of electrons and ions in solar flares // Ap. J. 1985. V. 298. P. 400.
9. *Mewaldt R.A., Cohen C.M., Haggerty D.K. et al.* The charge-to-mass dependence of solar energetic particle spectral breaks // Proc 30<sup>th</sup> ICRC. 2007. V. 1. P. 99.
10. *Nymmik R.A.* Probabilistic model for fluences and peak fluxes of solar energetic particles // Rad. Meas. 1999. V. 30. P. 287.
11. *Nymmik R.A.* The problems of cosmic ray particle simulation for the near-Earth orbital and interplanetary flight conditions. // Radiation measurements 1999. V. 30. P. 669.
12. *Tylka A.J., Cohen C.M., Dietrich W.F., Lee M.A., MacLennan C.G., Mewaldt R.A., Ng. C.K., and Reames D.V.* Shock geometry, seed populations, and the origin of variable elemental composition at high energies in large gradual solar particle events // Ap.J. 2005. V. 625. P. 474.
13. *Ведешин Л.Н., Ныммик Р.А., Рапопорт И.Д., Тутенков А.Ф.* Изучение космических лучей на спутнике Интеркосмос-6 // Вестник АН СССР. 1973. Т. 11. С. 59.

14. *Ныммик Р.А.* Наблюдение электронов с энергией  $\geq 10^{12}$  эВ в первичных космических лучах. // Космические исследования. 1981. Т. 19(6). С. 884.
15. *Chang J., Adams J.H., Ahn H.S., et al.* An excess of cosmic ray electrons at energies of 300-800 GeV // Nature. 2008. V. 456. № 20. P. 362.
16. *Ныммик Р.А.* Суточные вариации границ геомагнитного проникновения и функции проникновения // Космические исследования. 1991. Т. 29. № 3. С. 491.
17. *Ныммик Р.А., Панасюк М.И., Петрухин В.В., Юшков Б.Ю.* Быстрый метод расчёта вертикальной жёсткости обрезания в геомагнитном поле // Космические исследования. 2009. Т. 47. № 3. С. 211.
18. *Бобровская В.В., Горчаков Е.В., Григоров Н.Л., и др.* Потоки низко-энергичных ядер С, N, O на орбите Салют-6 // Космические Исследования. 1984. Т. 22(2). С. 310.
19. *Gagarin Yu.F., Marennу A.M., Nymmik R.A., Panasyuk M.I.* Heavy particle fluxes in Salyut space station orbit // Adv. Space Res. 1998. V. 21(12). P. 1699.
20. *Mazur J.E., Mason G.M., Klecker B., et al.* The abundance of hydrogen, helium, oxygen and iron accelerated in large solar particle events // Ap.J. 1993. V. 404. P. 810.
21. *Baranov D.G., Dergachev V.A., Gagarin Yu. F., et al.* About the energy spectra of solar energetic particle event heavy ions // Proc. 27<sup>th</sup> ICRC. 2001. P. 3181.
22. *Tylka A.J., and Dietrich W.* IMP-8 observations of spectra, composition, and variability of solar heavy ions at high energies relevant to manned space missions // Rad. Meas. 1999. V. 30. P. 345.
23. *GOES*, in: <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/logon.do>
24. *ACE*, in: <http://www.srl.caltech.edu/ACE/>
25. *Tylka A.J., Lee Martin A.* A model for spectral and compositional variability at high energies in large, gradual solar particle events // Ap.J. 2006. V. 646. P. 1319.
26. *ISO 15390, International Standard: Space environment (natural and artificial) – Galactic cosmic ray model.* 2004.

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Потоки легких ядер СКЛ (С - кружочки, N - треугольники, O- квадратики), измеренные на орбите станции «Салют-6» в мае 1981 года (белые символы) и пересчитанные к условиям вне магнитосферы Земли (черные символы). Ломаная линия – потоки ионов кислорода от солнечной вспышки 16 мая 1981, измеренные на спутнике IMP-8 прибором VLET.

Рис. 2. Потоки ионов Fe событий СКЛ, измеренные на станции «Мир» (черные кружки) и на ИСЗ IMP-8 приборами VLET (звездочки) и CRT (крестики) в 1989 году. Черные треугольники – потоки, пересчитанные с орбиты станции «Мир» к условиям вне магнитосферы Земли.

Рис. 3. Логарифмически усредненные по формуле (4) флюенсы ионов He для 54 событий СКЛ, измеренных на аппарате ACE (прибор SIS – черные кружки) и спутнике GOES (прибор EPEAD – белые кружки) за 1997-2006 годы. Ломаные линии обозначают ширину энергетических интервалов измерения. Аппроксимация данных по формулам (2 и 3) проведена плавными линиями.

Рис. 4. Логарифмически усредненные по формуле (4) флюенсы ионов СКЛ - He, O, Mg и S для очень больших (рис.4а) и средних (рис.4б) по величине событий СКЛ, измеренных прибором SIS на ИСЗ ACE за 1997-2006 годы.

Рис. 5. Логарифмически усредненные по 5 событиям СКЛ флюенсы He – измерения приборов SIS (черные кружочки) и ULEIS (черные квадраты) на аппарате ACE. Сплошная линия – аппроксимация, вычисленная по формулам (2) и (3) при использовании данных каналов 1, 4, 5, 6, и 7 прибора SIS. Штриховая линия – то же при использовании данных каналов 2, 3, 4, 5, 6 и 7.

Рис. 6. То же, что и на рис. 5 для ионов O. Линии – аппроксимации по формулам (2) и (3): сплошная – по данным SIS (исключены данные каналов 2 и 3); штриховая – исключены данные канала 1; пунктир – дополнительно учтены данные каналов 4-8 прибора ULEIS.

Рис. 7. Флюенсы ионов Fe – кружки и ионов Si – квадраты в событии СКЛ 28 октября 2003 г. (белые символы) и для 54 логарифмически усредненных событий (черные символы), измеренные прибором SIS аппарата ACE. Сплошные линии – аппроксимации усредненных спектров. Пунктирная линия – аппроксимация данных для ионов S без 8-ого канала, штриховая линия – аппроксимация данных каналов 5, 6 и 8 для Fe.

Рис. 8. Флюенсы ионов железа события СКЛ от 21 апреля 2002 г. по данным прибора SIS на аппарате ACE. Кружки – сумма среднечасовых потоков за 72 часа; треугольники то же за 24 часа. Ступенчатые линии – величины фоновых потоков ГКЛ за 72 часа (черные кружки) и 24 часа (черные треугольники). Линия из точек – фоновый поток за 72 часа, согласно модели ISO. Внутри большого кружка данные 7-ого канала. Линии: 1 – аппроксимация данных (включая 7-ой канал) формулами (2) и (3); 2 – аппроксимация этих же данных формулой (1); 3 – аппроксимация данных без 7-ого канала формулой (1).

Рис. 1

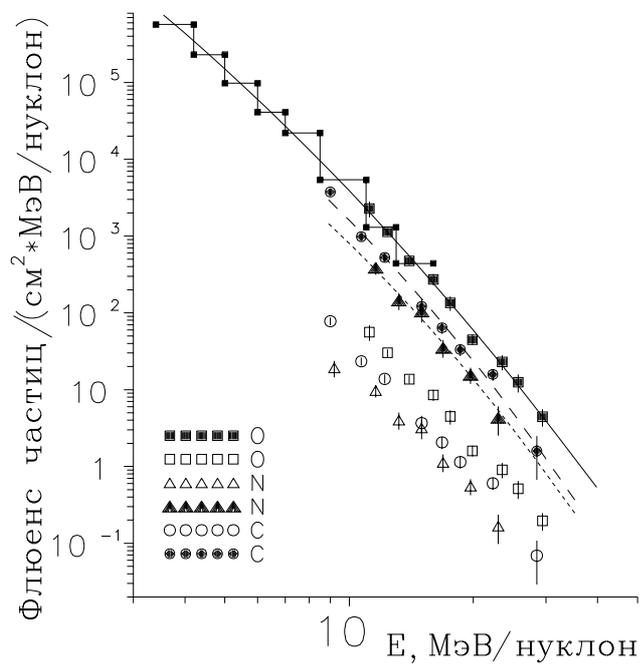


Рис. 2

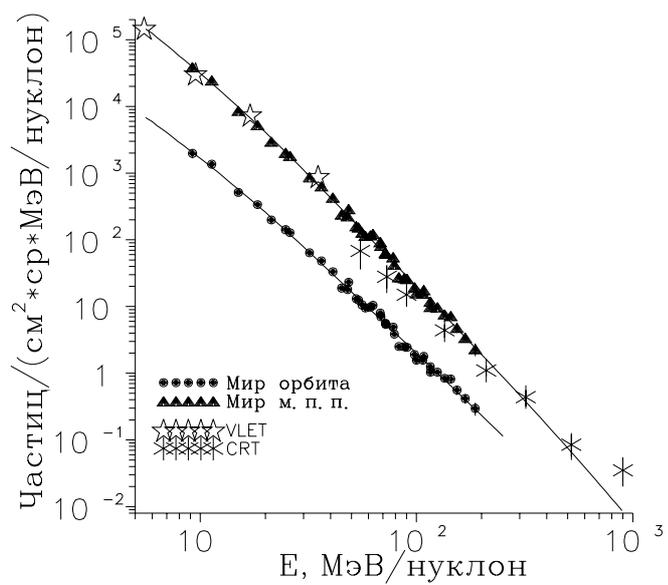


Рис. 3

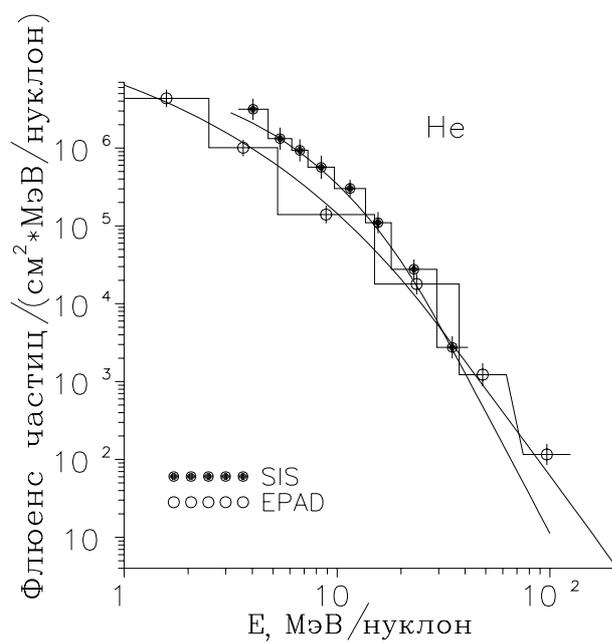


Рис. 4а

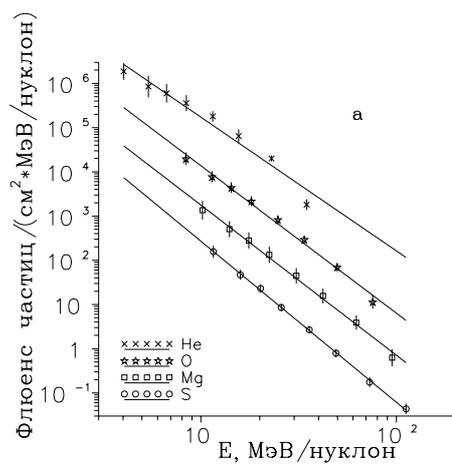


Рис. 4б

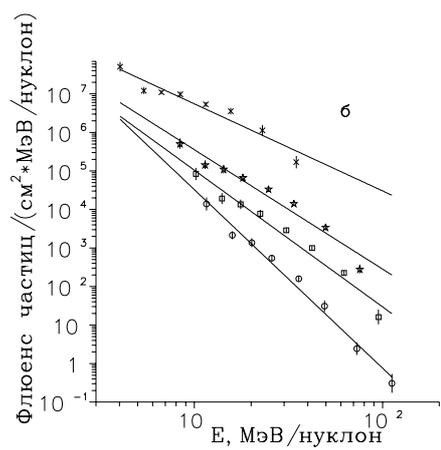


Рис. 5

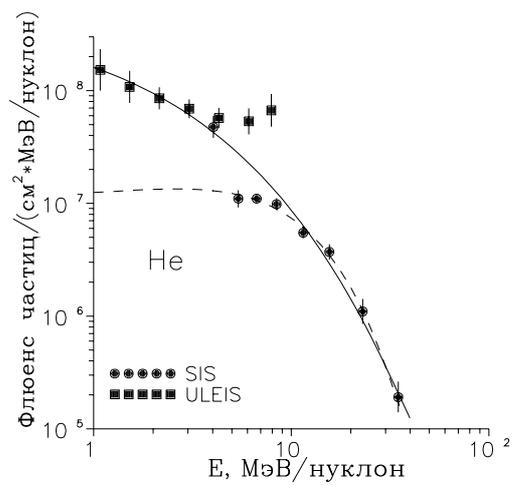


Рис. 6

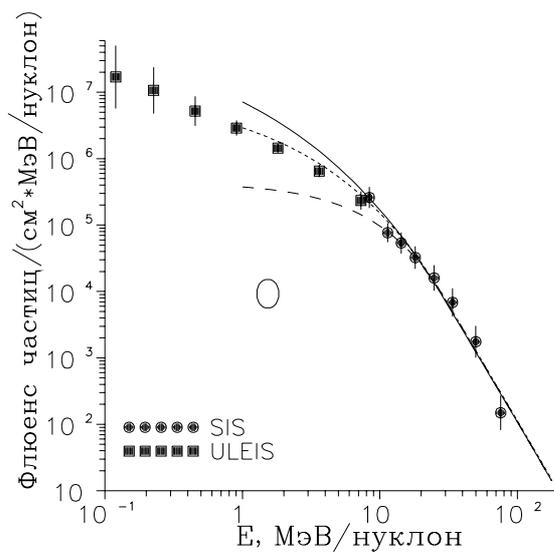


Рис. 7

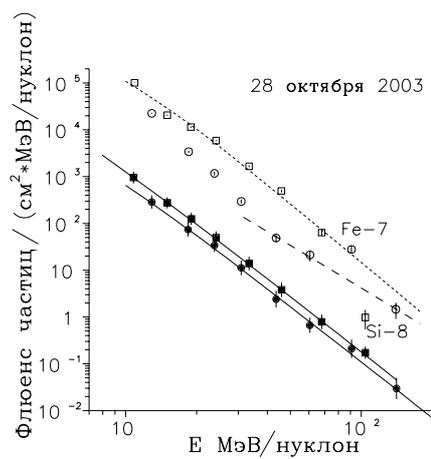
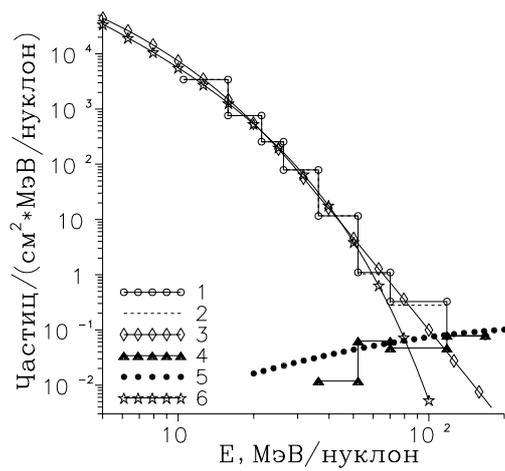


Рис. 8



**Д.Г. Баранов<sup>1</sup>, Ю.Ф. Гагарин<sup>1</sup>, В.А. Дергачев<sup>1</sup>, Р.А. Ныммик<sup>2</sup>, М.И. Панасюк<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Учреждение Российской академии наук Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
С.-Петербург*

<sup>2</sup>*Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского  
государственного университета им. М.В.Ломоносова, Москва*

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ И  
МЕТОДИКА ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИИ**

Препринт НИИЯФ МГУ № 2011-11/875

Работа поступила в ОНТИ 15.11.2011