

**ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ**  
**ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

---

---

С.О.СОХОЯН

**О ПОВЫШЕНИИ ТОЧНОСТЕЙ ХАРАКТЕРИСТИК  
АДРОН-ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ. ИЗМЕРЯЕМЫХ  
ИОНИЗАЦИОННЫМ КАЛОРИМЕТРОМ ПРИ ЭНЕРГИЯХ  
≥ 1,0 ТЭВ**

**ЦНИИатоминформ**

**ЕРЕВАН-1985**

© **Центральный научно-исследовательский институт информации  
и технико-экономических исследований по атомной науке  
и технике (ЦНИИатоминформ) 1985г.**

УДК 537.591:001.5

С.О.СОХОЯН

О ПОВЫШЕНИИ ТОЧНОСТЕЙ ХАРАКТЕРИСТИК  
АДРОН-ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ, ИЗМЕРЯЕМЫХ  
ИОНИЗАЦИОННЫМ КАЛОРИМЕТРОМ ПРИ ЭНЕРГИЯХ  
> 1,0 ТЭВ

Излагается методика корректного определения координаты первого взаимодействия адрона, инициирующего ядерно-электромагнитный каскад в веществе калориметра ( Fe ). Предлагается метод восстановления ядерно-каскадной кривой посредством интерполяции наблюдаемых на эксперименте дискретных точек функции поглощения энергии. Метод позволяет существенно повысить точности измерения таких характеристик ядерно-электромагнитного каскада, как полное число релятивистских частиц, глубина первого максимума и центр тяжести.

Ереванский физический институт

Ереван 1985

Preprint ERM-847(74)-85

S. O. SOKHOYAN

ON THE INCREASE OF THE ACCURACY OF CHARACTERISTICS  
OF HADRON-NUCLEUS INTERACTIONS MEASURED BY IONIZATION  
CALORIMETER IN THE ENERGY RANGE OF 1,0 TeV

A technique of correct determination of the first hadron interaction initiated by nuclear-electromagnetic cascade in calorimeter substance (Fe) is reported. A method of nuclear-cascade curve reduction by means of interpolation of experimentally observed discrete points of the energy absorption function is suggested. The method allows to essentially increase the accuracy of measurement of such nuclear-electromagnetic cascade characteristics as the total number of relativistic particles, the depth of the first maximum and the centre of gravity.

Yerevan Physics Institute

Yerevan 1985

Ядерно-электромагнитный каскад (ЯЭК) есть результат суперпозиции электромагнитных каскадов и продуктов ядерных расщеплений, образованных от адрон-ядерных взаимодействий первичного и вторичных адронов, распределенных по глубине поглотителя.

Уже первые экспериментальные исследования [1] показали, что форма ЯЭК определяется, главным образом, физическими характеристиками первого акта адрон-ядерного взаимодействия — множественностью и распределением энергии энергетически выделенных вторичных частиц, в том числе сохранившегося адрона.

Из литературы известны методы определения физических характеристик адрон-ядерных взаимодействий (таких, как полный —  $K$  и парциальный —  $K_{\pi^0}$  коэффициенты неупругости, структурные функции сохранившихся адронов и т.д.) по форме индивидуальных каскадов.

В работе [2], например, был предложен метод определения  $K_{\pi^0}$  исследованием корреляций между  $K_{\pi^0}$  и начальным моментом первого порядка (центром тяжести) ЯЭК; показано, что наличие нескольких максимумов ЯЭК обусловлено сохранившимся адроном, как правило энергетически выделенным [3].

Целью настоящей работы является поиск и разработка новых более корректных методов определения физических характеристик

адрон-ядерного взаимодействия при энергиях  $> 1$  ТэВ, основанных на исследовании в вычислительном "эксперименте" корреляций искоемых характеристик с параметрами ЯЭК в ионизационном калориметре (таких, как центр тяжести, дисперсия, асимметрия, глубина первого максимума и т.д.).

Методическая неопределенность в определении формы ядерно-электромагнитной каскадной кривой и энергии генерирующего адрона космического излучения в ионизационном калориметре (ИК) обусловлена неопределенностью в глубине генерации ЯЭК, немалыми величинами зенитного угла падения и толщины элементарного слоя поглотителя между двумя регистрирующими рядами, а также конечными размерами ИК.

На экспериментальной установке "Пион" [4,5] зенитный угол падения  $\theta$  в исследуемых событиях меняется в пределах  $0-40^\circ$ , а начало генерации определяется в пределах элементарного слоя толщиной  $\Delta t = 6 \text{ рад.ед.} / \cos \theta$ .

В настоящей работе предлагаются методы экстраполяции и интерполяции ядерно-каскадной кривой, позволяющие существенно уменьшить ошибки при измерении параметров ЯЭК.

В индивидуальном событии из измеряемых на эксперименте характеристик ЯЭК информацию о координатах генерации каскада несет не только ионизация, измеряемая на первом дискретном уровне наблюдения от начала генерации  $I_1$ , но также ионизация на втором уровне  $I_2$ , поскольку ход кривой в начале развития каскада формируется не менее чем по двум экспериментальным точкам.

Нами были проведены расчетные исследования корреляций между ионизацией на первом уровне наблюдения  $I_1$ , отношением ионизаций первых двух уровней и началом генерации каскада  $t_0$ ,

отсчитываемого от верхней границы элементарного слоя.

С этой целью для расчетных каскадов с фиксированными значениями энергии первичного адрона  $E_0$  и ионизационного толчка  $I_1$  определялось распределение количества вещества  $\Delta t_0 = \Delta t - t_0$  (где  $t_0$  - координата начала генерации в пределах элементарного слоя поглотителя толщиной  $\Delta t$ ) и его среднее значение  $\langle \Delta t_0 \rangle$  (рис.1).

Аналогично для трех значений энергии первичного адрона  $E_0$  (1; 1,5; 2,0 ТэВ) определены зависимости  $\langle \Delta t_0 \rangle$  от ионизации  $I_1$ , показанные на рис.2. Статистические веса расчетных значений  $\langle \Delta t_0 \rangle$  при аппроксимации взяты одинаковыми.

Как видно из рисунка, средние значения  $\langle \Delta t_0 \rangle$  слабо зависят от энергии (при изменении  $E_0$  в два раза  $\langle \Delta t_0 \rangle$  меняется менее, чем на 0,5 рад.ед.) в рассматриваемой области значений  $E_0$ .

Из рис.1 видно, что несмотря на достаточно хорошее разделение гистограмм  $W(\Delta t_0)$  по глубине поглотителя при  $I_1$ , отличающихся по величине в несколько раз (распределения 1 и 2 в сравнении с распределениями 3 и 4), при близких значениях  $I_1$  (распределения 1 и 2; 3 и 4 - попарно) они существенно перекрываются (более 50% общей площади под гистограммами), внося тем самым неопределенность в нахождение  $\langle \Delta t_0 \rangle$ .

Исследования показали, что величина  $\Delta t_0$  может быть уточнена, если зависимость ее среднего значения  $\langle \Delta t_0 \rangle$  определять в виде функции от величин  $I_1$ ,  $m = I_2 / I_1$  и  $E_0$ . С этой целью получены распределения величины  $\Delta t_0$  при фиксированных значениях  $I_1$  и отношения  $m = I_2 / I_1$  для трех значений энергии  $E_0$ .

На рис.3 показаны распределения величины  $\Delta t_0$  для трех

значений  $m$  в фиксированном интервале значений  $I_1$ . Из рисунка видно, что в результате дифференциации распределений, показанных на рис.1, не только уменьшаются флуктуации  $\Delta t_0$  (величина  $\sigma$  для распределений на рис.3 меняется в пределах 0,5 - 0,7, в то время как для распределения I на рис.1  $\sigma = 1,2$ ), но также, в результате очевидного сдвига распределений  $W(\Delta t_0)$  по глубине поглотителя с изменением  $m$  существенно уточняется величина  $\langle \Delta t_0 \rangle$ . Это позволяет в каждом индивидуальном событии величину  $\Delta t_0$  заменить ее средним значением  $\langle \Delta t_0 \rangle$ .

Численные расчеты показали, что величина  $t_n = \Delta t - \langle \Delta t_0 \rangle$  (глубина генерации ЯЭК в пределах элементарного слоя) для железного поглотителя может быть аппроксимирована функцией вида:

$$t_n = \Delta t + \alpha_1 I_1^2 \ln(\alpha_2 m) + \alpha_3 I_1 \ln(\alpha_4 m) + \alpha_5 \ln(\alpha_6 m \sqrt{E_0}), \quad (I)$$

где  $\alpha_1 = -0,11$ ;  $\alpha_2 = 0,103$ ;  $\alpha_3 = 0,44$  ;  
 $\alpha_4 = 0,086$ ;  $\alpha_5 = 0,93$  ;  $\alpha_6 = 0,008$ .

Величина  $I_1$  порядка  $10^3$  релятивистских частиц, а энергия первичного адрона  $E_0$  измеряется в тераэлектронвольтах.

На рис.4 для трех значений  $E_0$  приведены распределения отклонений величины  $t_n$ , полученной по эмпирической формуле (I), от  $t_0^{(расч)}$ , моделированной по экспоненциальному закону.

Из рисунка видно, что средние значения этих распределений близки к нулю, а среднеквадратические отклонения  $\sigma$  составляют 0,60 - 0,63 рад.ед., обеспечивая тем самым достаточно хорошую точность в определении начала генерации ЯЭК.

Принципиально возможно еще большее повышение точности в определении величины  $t_n$  за счет такой дискретизации функции развития  $f(t)$  по глубине поглотителя, при которой

распределения  $W(\Delta t_0)$  (см. рис.3) даже при близких значениях  $m$  практически не перекрываются. Однако это влечет за собой неоправданно большой расход машинного времени при моделировании ЯЭК, так как точности в определении параметров ядерно-каскадной кривой при варианте моделирования функции развития через каждые 0,5 рад.ед. достаточно высоки (что иллюстрируется ниже).

Исследования формы расчетных каскадов, моделированных методом Монте-Карло [6,7], показали, что наиболее оптимальной экстраполяцией распределения числа частиц по глубине  $t$  поглотителя в интервале между  $t_n$  и первым уровнем наблюдения  $t_1$  является параболическая функция вида:

$$f(t) = I_1 \left( \frac{t - t_n}{\Delta t - t_n} \right)^2 \quad (2)$$

с минимумом в точке  $t = t_n$  и проходящая через точку

$f_1(t_1) = I_1$ . В интервале между первым и вторым уровнями регистрации аналогично методу, изложенному в работе [8], проводилось усреднение двух парабол, проведенных через ионизации с координатами  $(0, t_n; I_1, t_1; I_2, t_2)$  - первая парабола; и через точки  $(I_1, t_1; I_2, t_2; I_3, t_3)$  - вторая парабола.

Интерполяция, описанная в [8], существенно улучшается при введении весов усреднения, зависящих от положения интерполяционной точки относительно дискретных уровней наблюдения:

$$\begin{cases} f_1(t) = \frac{\Delta t}{2(t - \Delta t)}, & \text{при } 0 < t < t_1; \\ f_2(t) = \frac{\Delta t}{2(2\Delta t - t)}, & \text{при } t_1 < t < t_2. \end{cases} \quad (3)$$

Методика определения наимвероятного начала генерации каскада экстраполяцией и интерполяцией ЯЭК по всей глубине поглощения энергии первичного адрона апробирована при обработке искусствен-

ных каскадов. С этой целью в расчетных каскадах, для которых определена функция распределения числа частиц  $f(t)$  через каждые 0,5 рад.ед., выбраны величины толчков ионизации, совпадающие по уровням наблюдения с экспериментальными уровнями. Значения функции  $f(t)$  на известных для моделированных каскадов уровнях были определены посредством использования этих ионизаций, как опорных точек экстраполяции и интерполяции.

Для каждого уровня были определены распределения разностей  $\Delta f(t_i) = (f^{(расч)}(t_i) - f^{(инт)}(t_i)) / f^{(расч)}(t_i)$  и их средние значения  $\langle \Delta f(t_i) \rangle$ . На рис.5 показаны изменения величины  $\langle \Delta f(t_i) \rangle$  в зависимости от положения интерполяционной точки относительно опорных уровней при двух значениях  $E_0$  (1,0 и 2,0 ТэВ).

Из рисунка видно, что точность восстановления каскадной кривой по предложенному методу лучше точности измерения экспериментальных опорных ионизаций, которая в среднем составляет  $\approx 10\%$  от измеряемой в ИК суммарной ионизации [4,5].

По тем же опорным точкам расчетных каскадов после восстановления их формы определены центр тяжести  $t_{ц.т.}^{(инт)}$ , глубина первого максимума  $t_{макс}^{(инт)}$  и площадь под ядерно-каскадной кривой  $S^{(инт)}$ , которые в таблице сравниваются с теми же величинами ( $t_{ц.т.}^{(расч)}$ ,  $t_{макс}^{(расч)}$ ,  $S^{(расч)}$ ) для расчетных каскадов с известными значениями  $f(t)$  через каждые 0,5 рад.ед. Наряду со средними значениями этих разностей в таблице приводятся соответствующие им среднеквадратические отклонения  $\sigma$ . Там же в сравнении с расчетными ЯЭК приведены величины ( $t_{ц.т.}^{(10)}$ ,  $t_{макс}^{(10)}$ ,  $S^{(10)}$ ), определенные по опорным точкам без восстановления формы каскадной кривой.

На рис.6 в качестве иллюстрации к табл. I приведены распреде-

ления величин  $\Delta S'$  и  $\Delta S''$  при  $E_0 = 2,0$  ТэВ. Из рисунка видно, что средние значения этих распределений (средние смещения) отличаются друг от друга более чем в четыре раза, а среднеквадратические отклонения  $\sigma$  - в три раза. Это может привести к существенным ошибкам в определении интеграла от функции поглощения ( $\approx 10\%$ ) в индивидуальном событии.

Из рис.6 , и из таблицы видно также, что предложенная методика обработки ЯЭК позволяет более чем в три раза повысить точность определения площади под ядерно-каскадной кривой, более чем в два раза - точность определения глубины первого максимума и более чем в четыре раза - точность определения центра тяжести индивидуальных ЯЭК.

Описанная методика используется в физической обработке экспериментального материала установки "Пион" для определения и сравнения характеристик неупругого акта пион-, протон- и нейтрон-ядерных взаимодействий при энергиях первичного адрона  $\geq 1$  ТэВ.

В заключение автор выражает благодарность В.В.Авакяну и Э.А.Намиджянну за стимулирующие замечания, дискуссии и поддержку в работе, М.М.Мурадянну за полезные советы и консультации, М.Д.Геворкян за помощь в обработке данных, а также коллективу вычислительного центра ЕРФИ за содействие в проведении расчетов на ЭВМ.

Таблица

$E_0$ (ТэВ)	1,0	1,5	2,0
$\langle \Delta t'_{\text{ч.т.}} \rangle = \langle (t_{\text{ч.т.}}^{(\text{расч})} - t_{\text{ч.т.}}^{(\text{инт})}) / t_{\text{ч.т.}}^{(\text{расч})} \rangle$ , %	-0,80	-0,60	-0,40
$\sigma_{\Delta t'_{\text{ч.т.}}}$	1,51	1,32	1,17
$\langle \Delta t''_{\text{ч.т.}} \rangle = \langle (t_{\text{ч.т.}}^{(\text{расч})} - t_{\text{ч.т.}}^{(10)}) / t_{\text{ч.т.}}^{(\text{расч})} \rangle$ , %	3,92	3,74	3,46
$\sigma_{\Delta t''_{\text{ч.т.}}}$	5,73	5,82	5,87
$\langle \Delta t'_{\text{макс}} \rangle = \langle t_{\text{макс}}^{(\text{расч})} - t_{\text{макс}}^{(\text{инт})} \rangle$ , рсг. ег.	0,04	0,12	0,19
$\sigma_{\Delta t'_{\text{макс}}}$	1,18	1,15	1,11
$\langle \Delta t''_{\text{макс}} \rangle = \langle t_{\text{макс}}^{(\text{расч})} - t_{\text{макс}}^{(10)} \rangle$ , рсг. ег.	-0,30	0,14	0,29
$\sigma_{\Delta t''_{\text{макс}}}$	3,59	3,42	3,34
$\langle \Delta S' \rangle = \langle (S^{(\text{расч})} - S^{(\text{инт})}) / S^{(\text{расч})} \rangle$ , %	1,16	0,96	0,89
$\sigma_{\Delta S'}$	2,03	1,67	1,57
$\langle \Delta S'' \rangle = \langle (S^{(\text{расч})} - S^{(10)}) / S^{(\text{расч})} \rangle$ , %	4,63	4,41	4,11
$\sigma_{\Delta S''}$	5,47	5,07	4,76

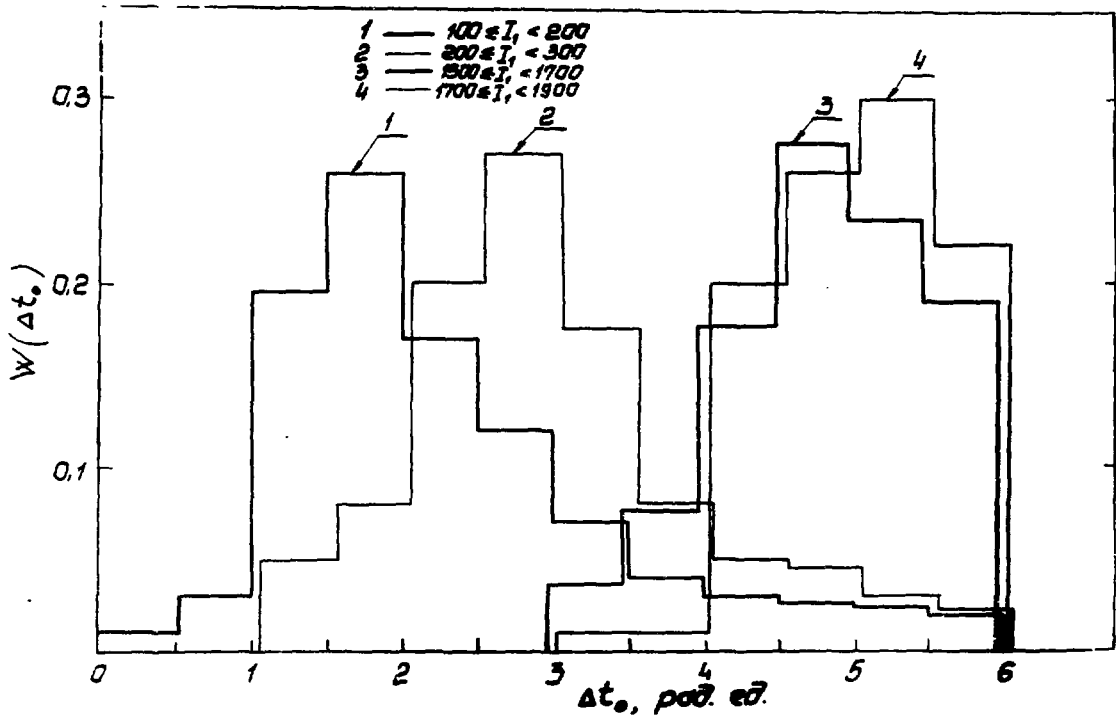


Рис.1 Распределение количества вещества  $\Delta t_0$  от точки генерации до первого уровня регистрации ЯЭК.

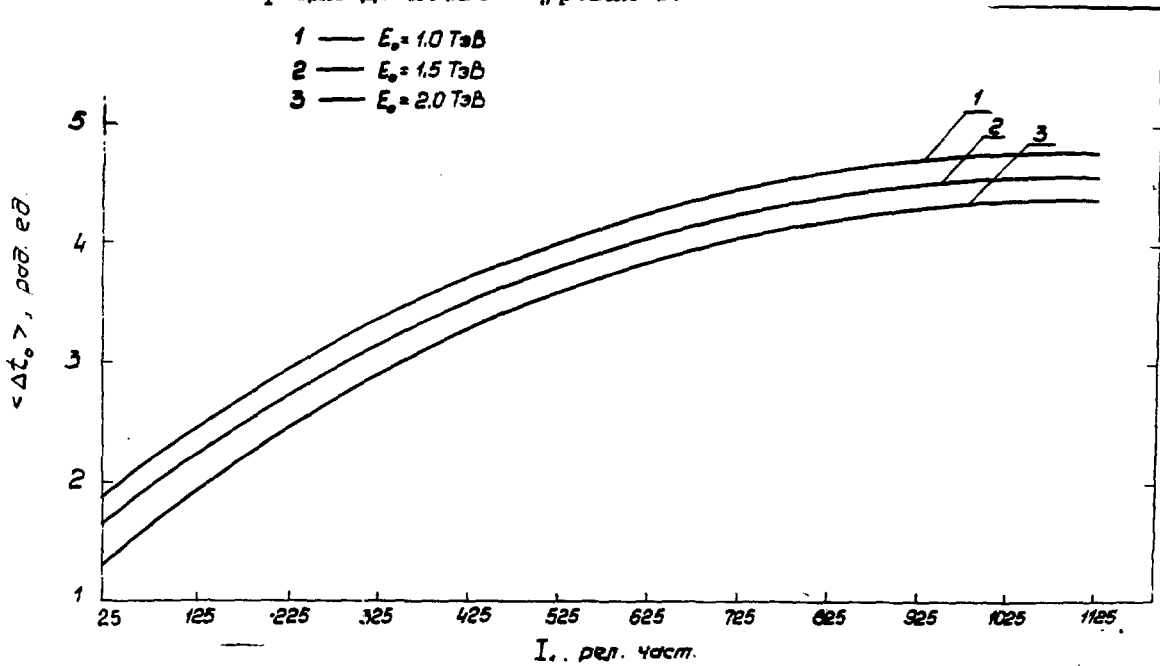


Рис.2 Расчетная зависимость среднего количества вещества  $\langle \Delta t_0 \rangle$  (от начала генерации до первого уровня наблюдения) от количества на этом уровне и энергии ЯЭК

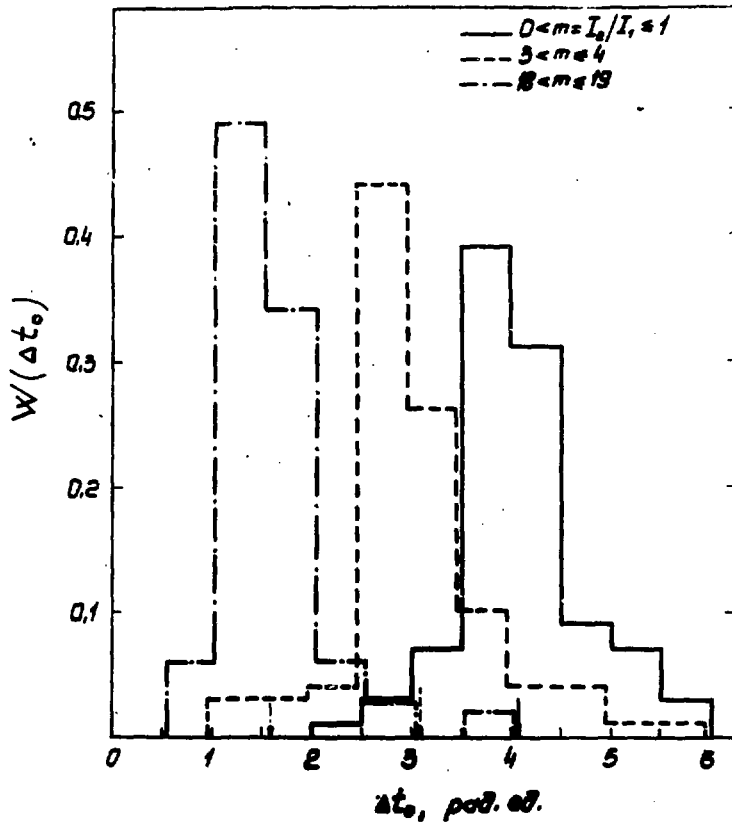


Рис.3 Распределение количества вещества  $\Delta t_0$  от точки генерации до первого уровня регистрации с ионизацией в интервале  $100$  (рел. част.)  $\leq I_1 < 200$  (рел. част.)

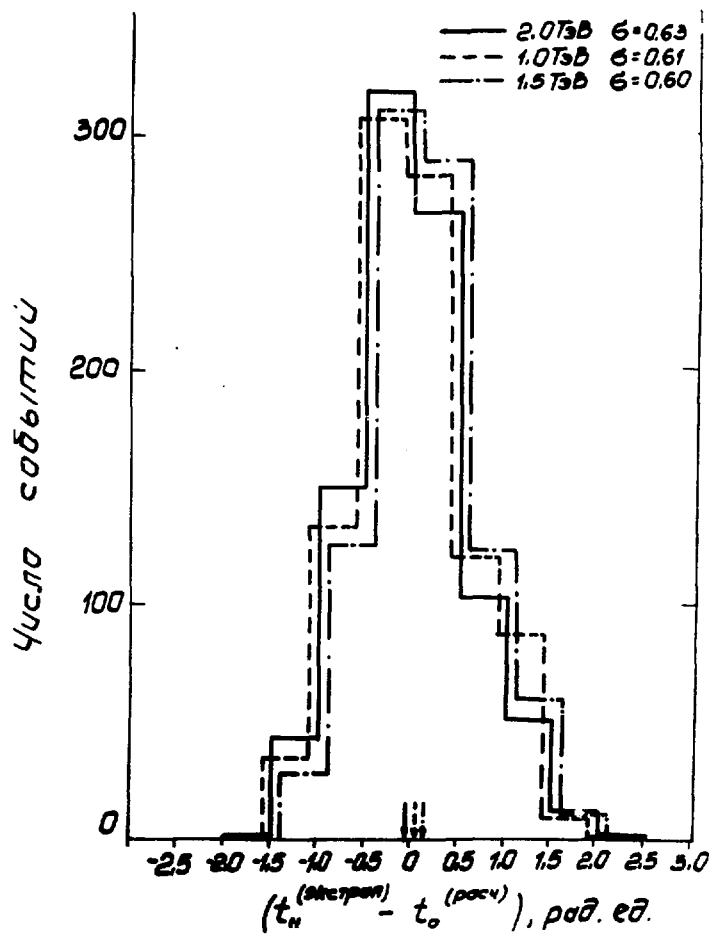


Рис.4 Распределение отклонения экстраполяционного начала гетчсации НЭК от истинного  $t_0^{(расч)}$

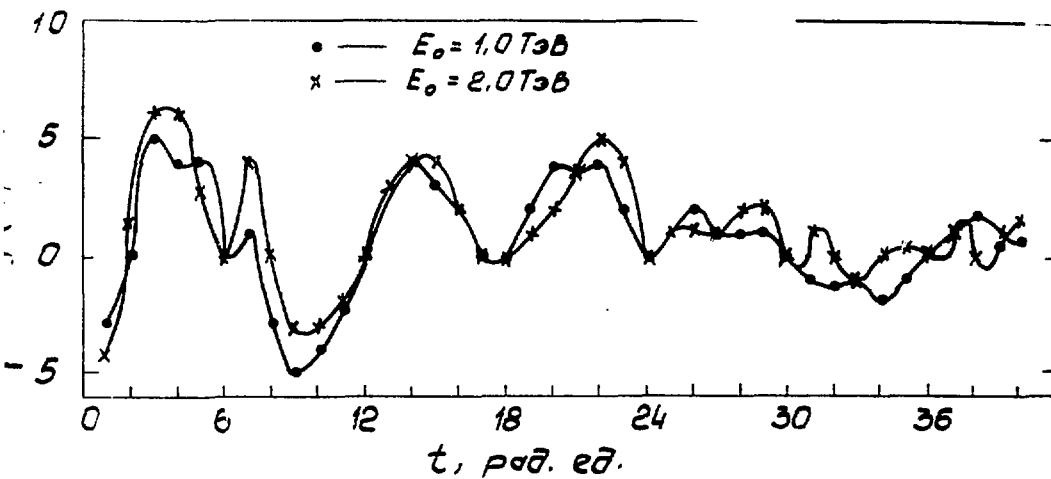


Рис.5 Средние смещения интерполяционных значений ионизации от истинных по глубине развития каскада

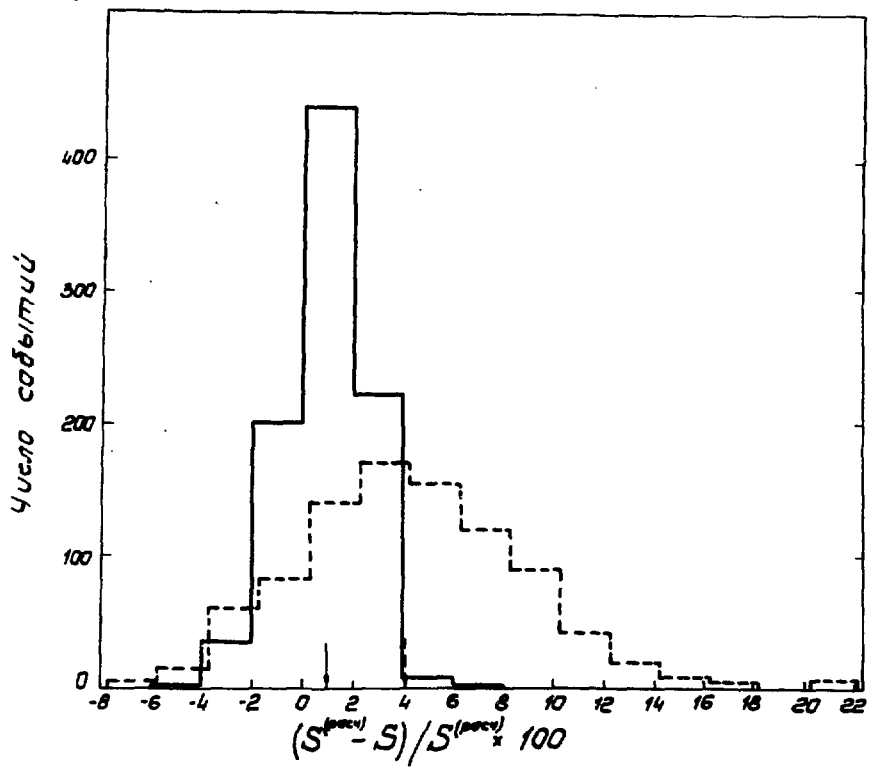


Рис.6 Распределение отклонений площади под каскадной кривой при прямом измерении (пунктир) и восстановленном ЯЭК (сплошная кривая) от истинной при  $E_0 = 2,0$  ТэВ

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мурзин В.С., Сарычева Л.И. Космические лучи и их взаимодействия. М., Атомиздат, 1968.
2. Авакян В.В., Мамиджянн Э.А., Мурадян М.М. и др. Определение парциальных коэффициентов неупругости пионов и протонов в железе при энергиях 0,5 - 5,0 ТэВ. ЯФ, 1982, т.36, вып.4(10).
3. Демьянов А.И., Мурзин В.С., Сарычева Л.И. Ядерно-каскадный процесс в плотном веществе, М., Наука, 1977.
4. Avakyan V.V., Avundzhyan A.T., Antonyan K.G. et al. Arrangement for the identification of cosmic ray hadrons and the measurement of interaction cross sections at energies  $E_0 > 500$  GeV.- In: Proc. of the 16th Intern. Conf. on Cosmic Rays, Kyoto, Japan, 1979, vol.13, p.61-65.
5. Авакян В.В., Авунджян А.Т., Антонян К.Г. Установка "Пион" ВАНТ, вып.4(16), Ереван, 1983, с.3-24.
6. Авакян В.В., Бадалян А.Р., Мамиджянн Э.А., Мурадян М.М. Об одном методе определения парциального коэффициента неупругости в адрон-ядерных взаимодействиях. ЯФ, 1982, т.36, вып.4(10)
7. Мамиджянн Э.А., Мартиросов Р.И., Мурадян М.М. Моделирование ядерно-электромагнитного каскада, генерированного адроном высокой энергии в железе. Препринт ЕФИ-238(31)-71, Ереван, 1971.
8. Мамиджянн Э.А., Мурадян М.М., Сохоян С.О. Применение интерполяций при исследовании ядерно-электронных каскадов, генерированных адронами космического излучения. Препринт ЕФИ-443(50)-80, Ереван, 1980.

Рукопись поступила 30 октября 1985 г.

**С.О.СОХОЯН**

**О ПОВЫШЕНИИ ТОЧНОСТЕЙ ХАРАКТЕРИСТИК АДРОН-ЯДЕРНЫХ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ, ИЗМЕРЯЕМЫХ ИОНИЗАЦИОННЫМ КАЛОРИМЕТРОМ  
ПРИ ЭНЕРГИЯХ  $\gt 1,0$  ТЭВ**

**Редактор Л.П.Мукаян**

**Технический редактор А.С.Абрамян**

---

**Подписано в печать 19/III-85г. ВФ-09209 Формат 60x84/16**

**Офсетная печать. Уч.изд.л. 1,0 Тираж 299 экз. Ц. 15**

**Зак.тип. № 600**

**Индекс 3624**

---

**Отпечатано в Ереванском физическом институте**

**Ереван 36, Маркаряна 2**

индекс 3624



ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ