

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ
РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. М.В.ЛОМОНОСОВА

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

Иваненко И.П., Рапопорт И.Д., Шестоперов В.Я., Басина Ю.В.,
Вакулов П.В., Васильев Ю.Я., Голынская Р.М., Гордеев Ю.П.,
Григорьева Л.Б., Казакова А.Е., Козлов В.Д., Кумпан И.П.,
Мищенко Л.Г., Никаноров В.М., Папина Л.П., Платонов В.В.,
Подорожний Д.М., Самсонов Г.А., Смоленский Л.Г., Собиняков В.А.,
Тамбовцев Г.Е., Тригубов Ю.В., Фатеева И.М., Федоров А.Н.,
Хейн Л.А., Чикова Л.О., Ширяева В.Я., Яковлев В.М., Яшин И.В.

Препринт НИИЯФ МГУ - 88 - 6/83.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВЫСОКОЙ
ЭНЕРГИИ НА ИСЗ "КОСМОС-1543" И "КОСМОС-1713" С АППАРАТУРОЙ
"СОКОЛ"

Часть II. Погрешности энергетических измерений

Москва 1988

В работе рассматривается точность энергетических измерений при регистрации частиц первичных космических лучей высокой энергии, выполненных ионизационным калориметром ограниченных размеров, и учет выносимой за пределы калориметра и нерегистрируемой части энергии. Исследуются инструментальные погрешности, связанные с аппаратурными особенностями первого эксперимента.

© НИИ ядерной физики МГУ, 1988

4. Поглощение энергии в ионизационном калориметре

Как уже отмечалось в первой части, оценка энергии, выносимой через нижнее основание ионизационного калориметра, осуществлялась в предположении экспоненциального затухания каскада, при этом для определения длины поглощения в зависимости от энергии использовалось эмпирическое выражение, полученное в [1] в качестве аппроксимации ускорительных и космических данных для каскадов от протона в диапазоне энергий $20 - 2 \cdot 10^4$ ГэВ. Это выражение использовалось нами и для случаев более тяжелых первичных ядер с учетом, в рамках модели суперпозиции, энергии, приходящейся на каждый из нуклонов ядра.

Представлялось необходимым в этой связи выяснить оправданность такого приближения и оценить энергетическую погрешность, вносимую используемой формулой для частиц такой природы, в условиях конкретной структуры калориметра.

С этой целью был использован экспериментальный материал, полученный в полете с аппаратурой "Сокол-2". Полученные в эксперименте данные о поглощении энергии в калориметре - каскадные кривые - после соответствующей нормировки статистически усреднялись по некоторым энергетическим интервалам $Q(t) = \langle \frac{\partial E}{\partial t}(t) / E \rangle$. Далее исследовалось затухание каскада в области, где $Q(t) \sim e^{-t/L}$ (на уровне 7-10 рядов ИК). Заметим, что в этой области форма каскадной кривой лишь слабо логарифмически зависит от энергии и поэтому допускает предпринятые усреднения по небольшим энергетическим интервалам без существенной погрешности.

На рис. 1 приведены каскадные кривые, полученные для всех зарегистрированных частиц с центральным прохождением в ИК (класс A^*) в энергетических интервалах $2 < E \leq 5$ ТэВ и $E > 5$ ТэВ. На рис. 2 приведены аналогичные данные для протонов (класс A^* , режим регистрации $m = 5$) с энергией $E > 3$ ТэВ, взаимодействие которых было зарегистрировано в I ряду ИК, а также взаимодействовавших во всех рядах. На рис. 3 приведены полученные аналогичные данные для групп ядер C, N, O и Fe (класс A^* , $E > 3$ ТэВ). В табл. I

помещены результаты определения пробега поглощения энергии $\bar{L}$ на "хвосте" каскадных кривых на уровне 7-10 рядов ИК (430-670 г·см⁻²).

Таблица I
Результаты определения пробега поглощения энергии

Природа первичной частицы	Протоны		Ядра группы C, N, O	Ядра группы Fe
	Взаимодейс- твие в 1 ря- ду ИК	Взаимодейс- твие во всех рядах ИК		
$\bar{L}$ г·см ⁻² данный экспери- мент	406±10	365±24	308±12	256±3
$\bar{L}$ г·см ⁻² по эмпирической формуле [1/]	367		261	209

Заметим, что разброс экспериментальных точек относительно сглаженных каскадных кривых здесь невелик ($\leq 10\%$). Возможные систематические погрешности, обусловленные неточностью калибровки отдельных рядов ИК, исключаются рассмотрением относительных величин поглощения для одних компонент сравнительно с другими, в частности, для ядер групп C, N, O или Fe по отношению к протонам. Эти отношения затухают $\sim e^{-t(\frac{L_{CNO}}{L_P} - \frac{L}{L_P})}$ и $\sim e^{-t(\frac{L_{Fe}}{L_P} - \frac{L}{L_P})}$, соответственно (рис. 4). Пользуясь здесь данными для 7-10 рядов, получим: $(\frac{L_{CNO}}{L_P} - \frac{L}{L_P}) = (8,5 \pm 1,1) \cdot 10^{-4} \text{ г}^{-1} \text{ см}^{-2}$; $(\frac{L_{Fe}}{L_P} - \frac{L}{L_P}) = (1,5 \pm 0,06) \cdot 10^{-3} \text{ г}^{-1} \text{ см}^{-2}$. Для этих же разностей непосредственно из данных табл. I следуют соответствующие значения $(7,8 \pm 0,4) \cdot 10^{-4} \text{ г}^{-1} \cdot \text{см}^2$ и $(1,44 \pm 0,04) \cdot 10^{-3} \text{ г}^{-1} \cdot \text{см}^2$. Их небольшое отличие ($< 10\%$) от предыдущих свидетельствует о малой значимости возможных систематических погрешностей.

Оценим ошибки в определении энергии, к которым может привести использование эмпирической формулы для определения $\bar{L}$, в отличие от значений, полученных по данным самого эксперимента. Это отличие, составляющее $\sim 10\%$ для протонов, $\sim 15\%$ для ядер группы C, N, O и $\sim 20\%$ для ядер группы Fe, может привести к занижению оценки энергии частиц на $\sim 2\%$.

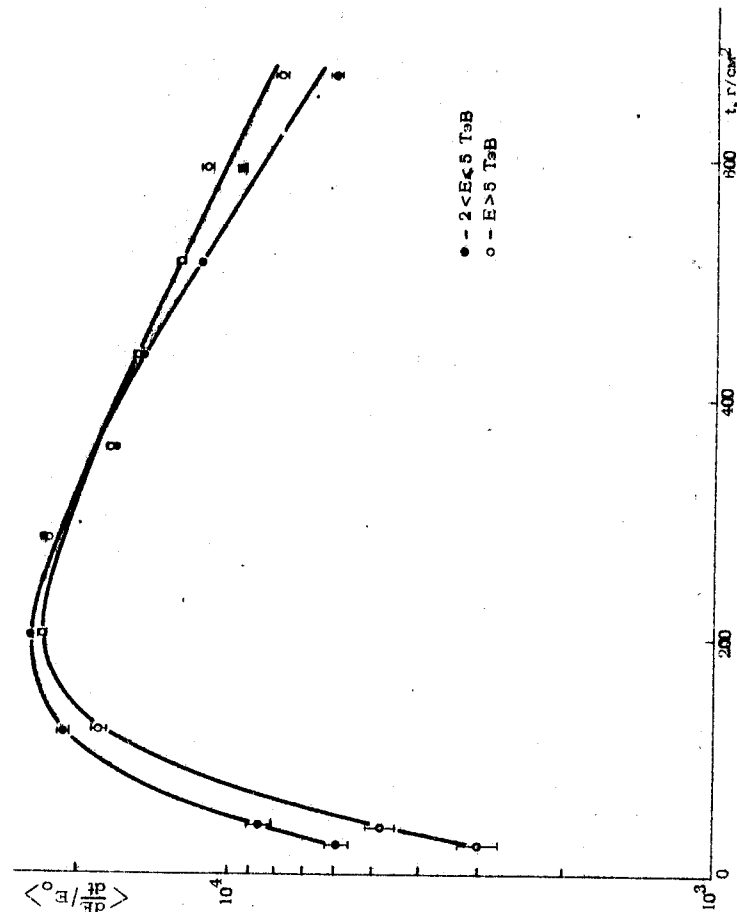


Рис. 1. Каскадные кривые для двух энергетических интервалов ("Сокол-2") (распределение величины относительно удельного энерговыделения $(\frac{dE}{dt} / E_0)$ по глубине t ионизационного calorиметра)

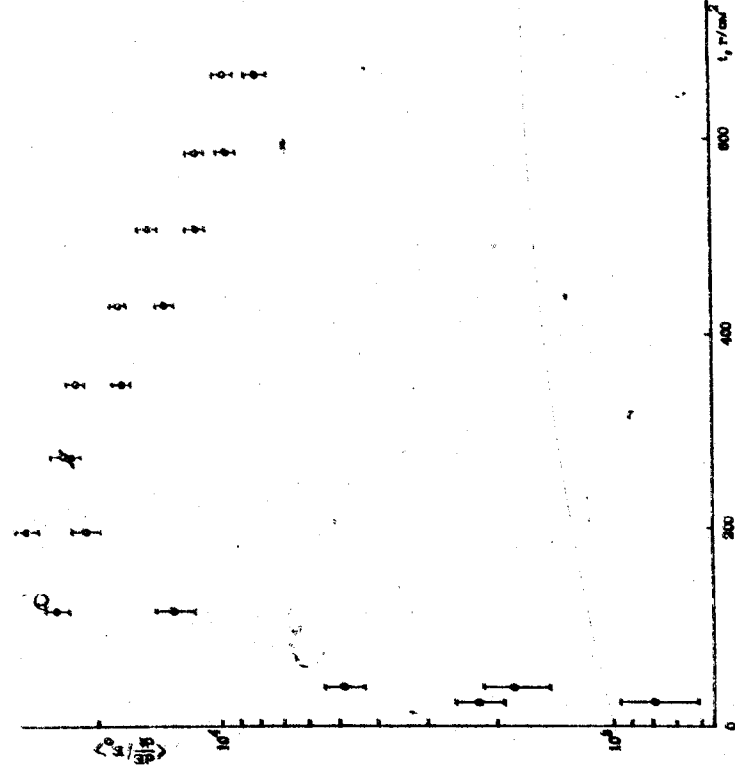


Рис. 2. Каскадные кривые для протонов с энергией $E_0 > 3 \text{ ТэВ}$ ("Сокол-2"; черные точки - для частиц с первым взаимодействием в поглотителе 1-го рода, светлые - в любом роду НК)

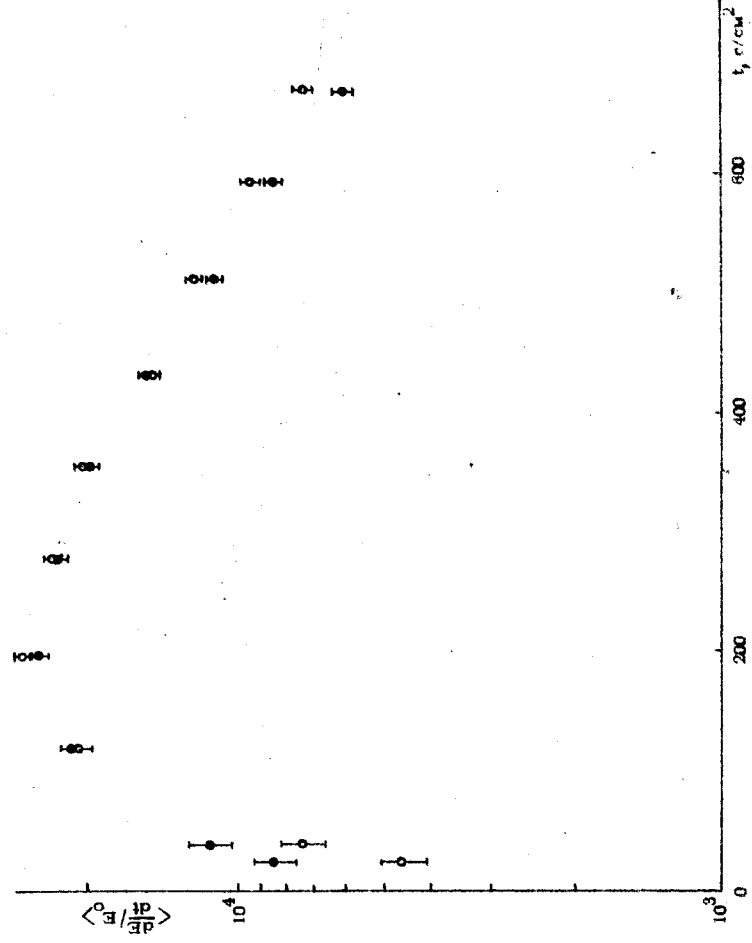


Рис. 3. Каскадные кривые для ядер C, N, O и Fe с энергией $E_0 > 3 \text{ ТэВ}$ ("Сокол-2"; светлые точки - для C, N, O; черные - для Fe)

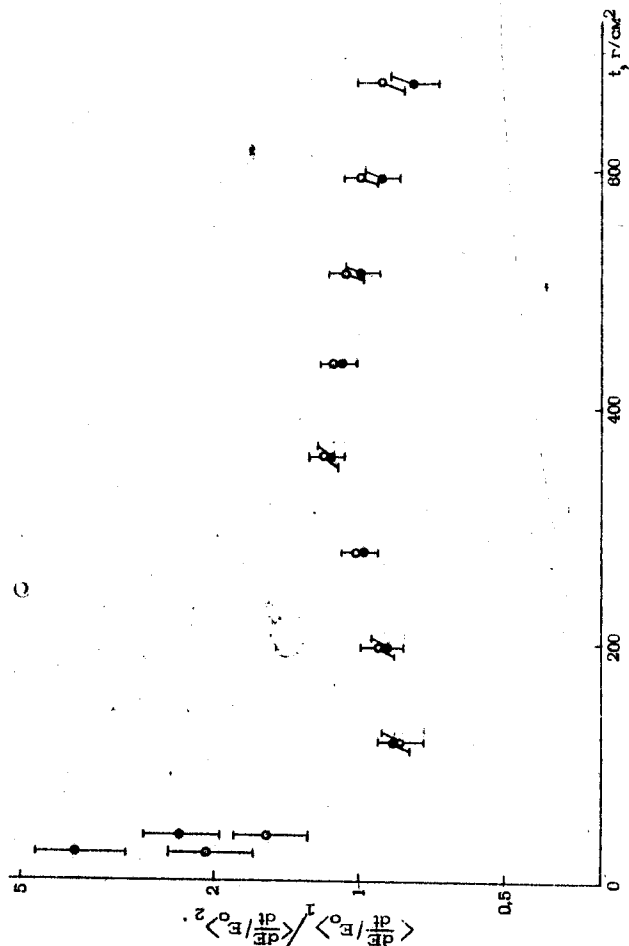


Рис. 4. Отношение нормированных к энергии ($E_0 > 3 \text{ ТэВ}$) удельных энерговыделений $\langle \frac{dE}{dt} / E_0 \rangle_1$, зарегистрированных для ядер группы C, N, O (светлые точки) и для Fe (черные точки), к аналогичной величине $\langle \frac{dE}{dt} / E_0 \rangle_2$ для протонов на разных глубинах t ионизационного калориметра ("Сокол-2")

Б. К определению энергии, выносимой за боковые грани ионизационного калориметра

Энергия, выносимая за боковые грани, зависит от положения ливневой оси (m, h) и широты распределения по секциям энергии, зарегистрированной в данном ряду ИК, где m и n - дискретные (с шагом секций) координаты ливневой оси, отсчитываемые от ближайших граней ИК соответственно - по фронту секций (m) и в ортогональном направлении (h).

Анализ данных, полученных в эксперименте "Сокол-2", показал, что в развитом каскаде в центральной секции m регистрируется в среднем $\sim 70\%$ энерговыделения в ряду (IV-X ряды ИК), а распределение, занимающее до $i_m = 3$ секций в стороны от центральной ($m \pm i_m$) может быть аппроксимировано ^{нормальным} законом со стандартным отклонением $\sigma \sim 4$ см. Характер распределения, идентичный в проекциях X и Y ИК, сохраняется с вариацией $n = 1+4$ ($m = 4$). Исходя из этого, в дальнейшем рассмотрении принимаются следующие соотношения для парциальных энерговыделений E_k , регистрируемых в секциях ряда ИК:

$$\langle E_{m+i} \rangle = \langle E_{m-i} \rangle \quad (1)$$

$$\langle E_i \rangle_n : \langle E_j \rangle_n = \langle E_i \rangle_{n'} : \langle E_j \rangle_{n'}; (h > h') \quad (2)$$

В случае центрального прохождения ливневой оси - $m = 4$, $n = 4$ ($m, n = i_m + 1$) практически все энерговыделение E детектируется секциями ряда ИК

$$E = \sum_{i=0}^{i_m} E_{m+i} + \sum_{i=1}^{i_m} E_{m-i}$$

В случае $m < 4$ ($m < i_m + 1$), $n = 4$ часть энергии выносится за грань, перпендикулярную оси m , и регистрируемая энергия $E_p < E$

$$E_p = \sum_{i=0}^{i_m} E_{m+i} + \sum_{i=1}^{m-1} E_{m-i};$$

$$E = \sum_{i=0}^{l_m} E_{m+i} + \sum_{i=1}^{m-1} E_{m-i} + \sum_{i=m}^{l_m} E_{m-i} = E_p + \sum_{i=m}^{l_m} E_{m-i}.$$

С учетом (1) -

$$\sum_{i=m}^{l_m} E_{m-i} = \sum_{i=m}^{l_m} E_{m+i}, \text{ и}$$

$$\Delta E = E - E_p = \sum_{i=m}^{l_m} E_{m+i}.$$

В случае $n < 4$ часть энергии - E_x - выносится и за боковую грань, перпендикулярно оси n . С учетом этой энергии, в общем случае $E = E_p + \sum_{i=m}^{l_m} E_{m+i} + E_x$.

В соответствии с (2)

$$E_x : E = \left(\sum_{i=n}^{l_m} E_{m+i} \right) : \left(E_p + \sum_{i=m}^{l_m} E_{m+i} \right).$$

Отсюда

$$E = (E_p + \sum_{i=m}^{l_m} E_{m+i})^2 / (E_p + \sum_{i=m}^{l_m} E_{m+i} - \sum_{i=n}^{l_m} E_{m+i}), \text{ и}$$

$$\Delta E = E - E_p = \sum_{i=m}^{l_m} E_{m+i} + \sum_{i=n}^{l_m} E_{m+i} + \left(\sum_{i=n}^{l_m} E_{m+i} \right)^2 / (E_p + \sum_{i=m}^{l_m} E_{m+i} - \sum_{i=n}^{l_m} E_{m+i}).$$

В других обозначениях -

$$\Delta E = E - E_p = S_{2m-1} + S_{m+n-1} + S_{m+n-1}^2 / (S_0 + S_{2m-1} - S_{m+n-1}),$$

где S_k - суммарное энерговыделение, регистрируемое в секциях с номером $> k$ данного ряда ИК.

В алгоритме компьютерной обработки данных эксперимента "Сокол-2" для определения энергии, выносимой через боковые грани ИК, было принято приближенное (с точностью $\sim 1\%$) выражение

$$\Delta E \approx S_{2m-1} + S_{m+n-1} + S_{m+2n-1}$$

Для частных случаев $m = 1$; $n = 4$ и аналогично - $m = 4$; $n = 1$ это дает $\Delta E \approx 0,2 E_p$ и соответствующий поправочный коэффициент $E/E_p \approx 1,2$.

Для предельного случая ($m = 1$, $n = 1$) $\Delta E \approx 0,4$, $E/E_p \approx 1,4$.

Средняя величина $\langle \Delta E \rangle$ по всем зарегистрированным событиям составила $\sim 4\%$.

6. Флуктуации энерговыделения в ионизационном калориметре

Введение описанных выше энергетических поправок позволило учесть энергию, выносимую за пределы ионизационного калориметра и расходующую на ядерные расщепления, и определить, с некоторым приближением, энергию первичной частицы E_0 в каждом регистрируемом случае ("Сокол-2"). Сопоставление регистрируемой (выделяемой) в ИК энергии, $E_{\text{выд}}$, с первичной, E_0 , дает при этом возможность исследовать характер флуктуаций энерговыделения в калориметре при регистрации частиц разной энергии и природы. Это может представить особый интерес для выяснения эффективности регистрации частиц и возможных спектральных искажений в области околороговых энергий. Материал для такого рассмотрения представляют данные эксперимента "Сокол-2".

Как уже отмечалось, регистрация частиц в аппаратуре "Сокол" обуславливается двумя энергетическими порогами: а) $E_{\text{пор}}$ для суммарного энерговыделения в ИК; б) порогом $\mathcal{E}$ для энерговыделения в каждом из M обусловленных мастером рядов ИК.

Второе мастерное условие, как будет показано позднее, в режиме $\mathcal{E} = \mathcal{E}_2$ и $M = 5$ (основной режим работы прибора "Сокол-2" в полете) перестает быть существенным в области $E_{\text{выд}} > 1,6 \text{ ТэВ}$ для частиц, взаимодействующих в верхних (трех) рядах ИК. На рис. 5 приведен дифференциальный спектр энерговыделений для событий, зарегистрированных при этом режиме и условиях (в пределах рабочей апертуры прибора, класс А). В качестве ближайшей к порогу регистрации спектрально неискаженной области энергий здесь можно отметить события с $E_{\text{выд}} > 1,6 \text{ ТэВ}$. Для исследования интересующих нас флуктуаций здесь были отобраны события в относите-

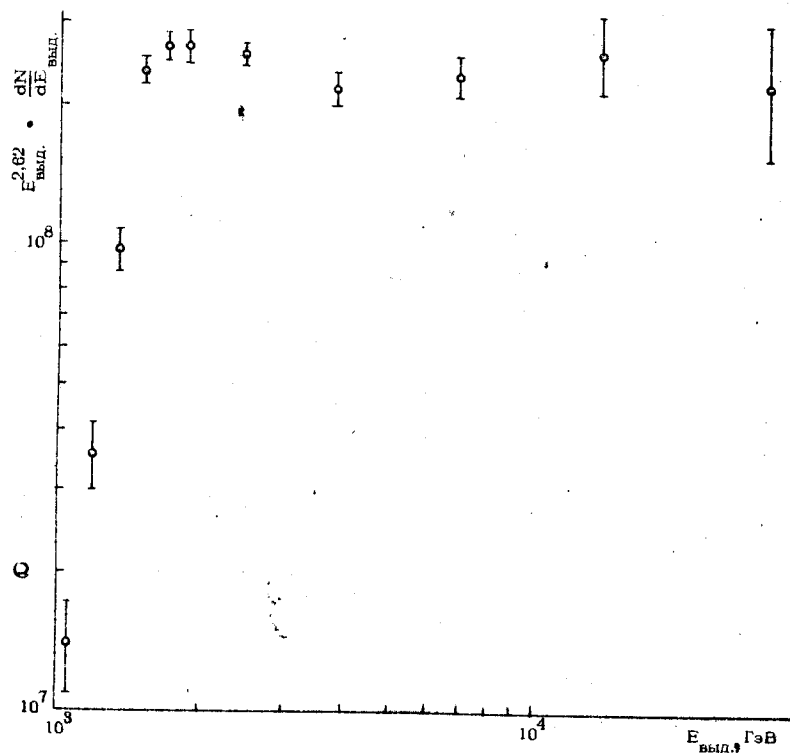


Рис. 5. Дифференциальный спектр энерговыделений в ИК для частиц, зарегистрированных прибором "Сокол-2", с взаимодействием в верхних трех рядах ИК

льно небольшом интервале энергий $1,6 \text{ ТэВ} < E_{\text{выд}} < 2 \text{ ТэВ}$.

Полученное для этих событий интегральное распределение по величине относительного энерговыделения $r = E_{\text{выд}}/E_0 - P(<r)$ приведено на рис. 6. Для $E_{\text{выд}} = E_{\text{пор}}$ величина $P(<\frac{E_{\text{пор}}}{E_0})$ выражает долю событий с энергией первичных частиц E_0 , не регистрируемую из-за флуктуации $E_{\text{выд}}$ ниже $E_{\text{пор}}$. Для событий в дифференциальном интервале $(E_0, E_0 + \Delta E)$ доля нерегистрируемых частиц определится выражением:

$$\langle p \rangle = \int_{E_0}^{E_0 + \Delta E} E^{-\gamma} \cdot p(<\frac{E_{\text{пор}}}{E}) dE / \int_{E_0}^{E_0 + \Delta E} E^{-\gamma} dE,$$

где γ — показатель дифференциального энергетического спектра частиц.

Варьируя $E_{\text{пор}}$ и исключая каждый раз из статистического материала события с $E_{\text{выд}} < E_{\text{пор}}$, можно получить дифференциальный спектр по E_0 , отвечающий данному $E_{\text{пор}}$, и выяснить возможность коррекции полученных значений интенсивности в околороговой области с помощью коэффициента $(1 - \langle P \rangle)^{-1}$. Удовлетворительный результат такой процедуры восстановления спектра вблизи заданного порога должен свидетельствовать об определяющей роли флуктуаций $E_{\text{выд}}$ для спектральных искажений в этой области энергий.

Эта программа была реализована для нескольких значений $E_{\text{пор}}$. Полученный дифференциальный спектр по E_0 и результаты его коррекции для случая $E_{\text{выд}} = 1,6 \text{ ТэВ}$ приведен на рис. 7. Удовлетворительные результаты коррекции, иллюстрируемые рис. 7, позволяют заключить об определяющем значении флуктуаций $E_{\text{выд}}$ в области $E_0 > 1,6 \text{ ТэВ}$ и возможности благодаря этому использовать распределение $P(<r)$ для реконструкции спектра в околороговой области.

Эта методика, развитая выше для спектра всех частиц, может быть использована и для отдельных компонент. На рис. 8 приводится полученное в тех же условиях и близкое к предыдущему интегральное распределение $P(<r)$ для протонов, зарегистрированных в эксперименте "Сокол-2". Приведенный далее (рис. 9) дифференциальный спектр по E_0 для протонов при том же пороговом зна-

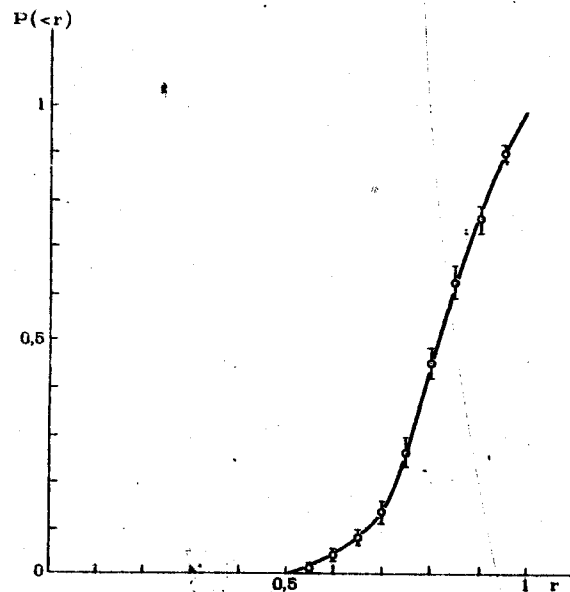


Рис. 6. Интегральное распределение $P(<\gamma)$ по величине $\gamma = E_{\text{выд}}/E_0$ для частиц, взаимодействующих в верхних трех рядах ИК ("Сокол-2")

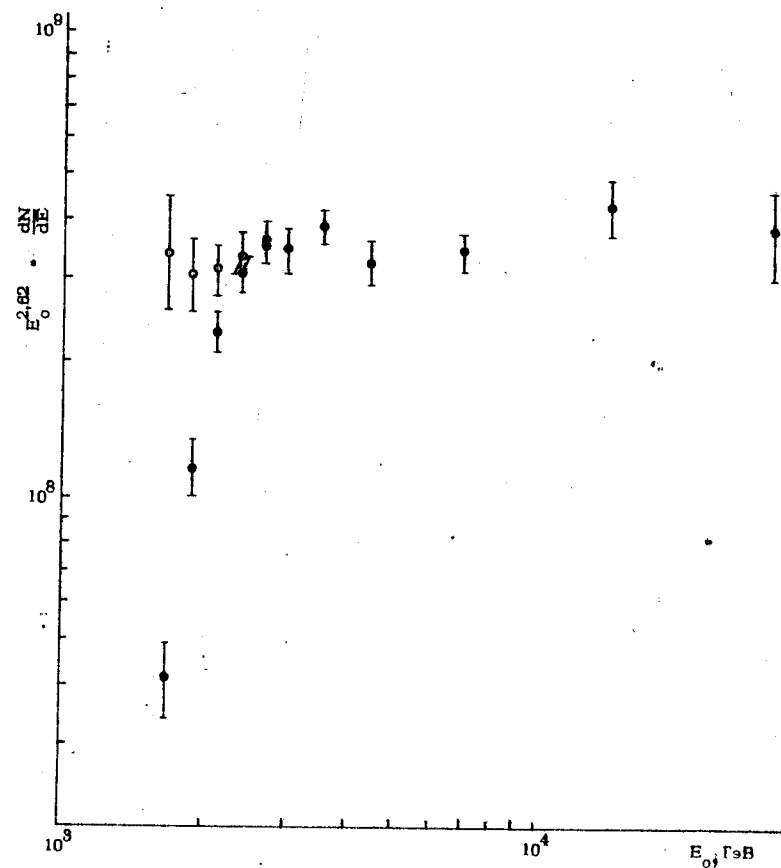


Рис. 7. Дифференциальный энергетический спектр по E_0 для частиц, зарегистрированных с $E_{\text{выд}} > 1,6$ ТэВ (черные точки - до коррекции, светлые - после коррекции).

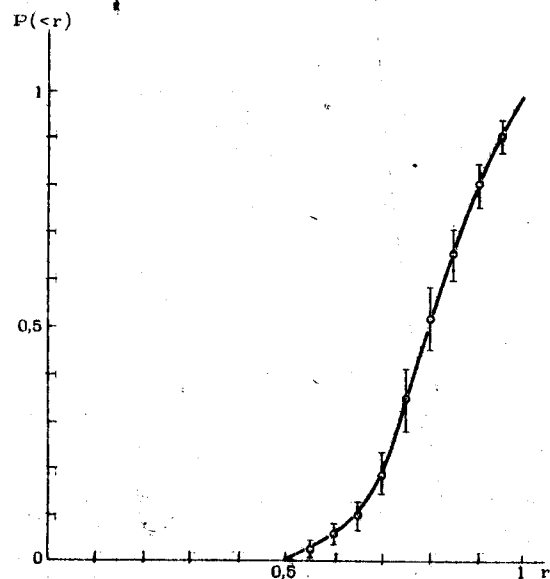


Рис. 8. Интегральное распределение $P(<r)$ по величине $r = E_{\text{выд}}/E_0$ для протонов, проваимодействовавших в верхних трех рядах ИК ("Сокол-2")

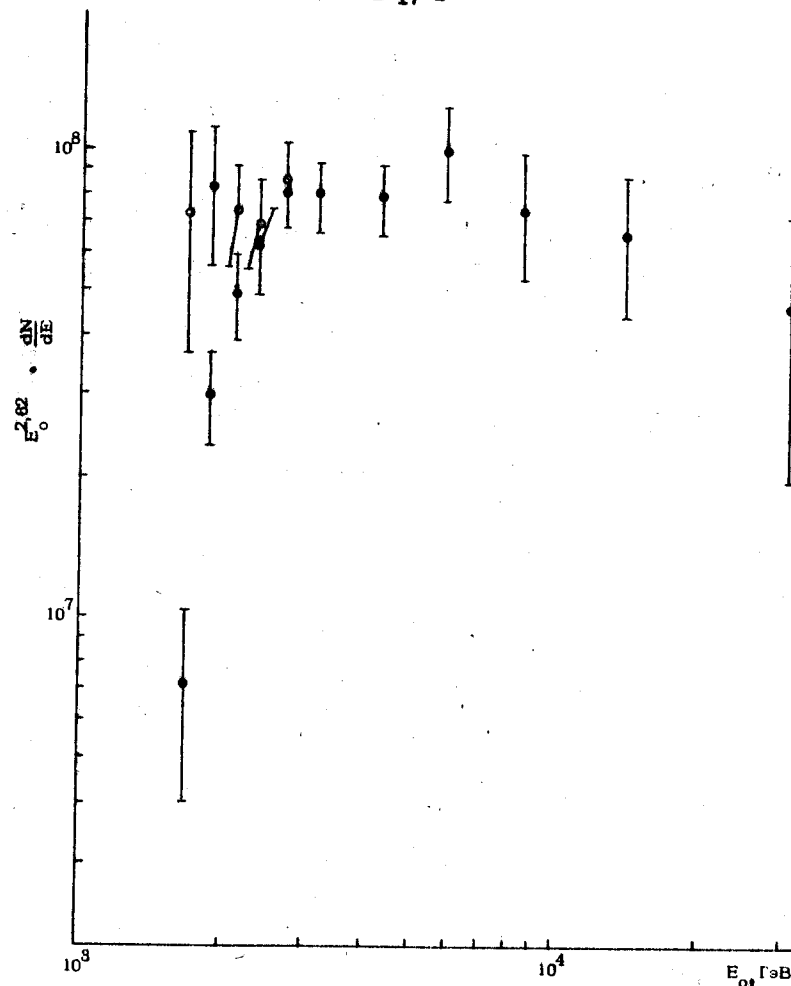


Рис. 9. Дифференциальный энергетический спектр по E_0 для протонов, зарегистрированных с $E_{\text{выд}} > 1,6$ ТэВ (черные точки - до коррекции, светлые - после коррекции)

чении по $E_{\text{выд}}$, что и в предыдущих случаях, в сравнении с результатом их корректировки с помощью распределения $P(<r)$, подтверждает роль флуктуаций $E_{\text{выд}}$ и возможность восстановления спектра в области $E_0 > 1,6$ ТэВ аналогично предыдущей методике.

Из распределения флуктуаций $E_{\text{выд}}$, представленного на рис. 8, можно, в частности, оценить среднюю величину $E_{\text{выд}}/E_0$ для протонов, взаимодействующих в верхних трех рядах ИК, равной $\langle E_{\text{выд}}/E_0 \rangle = 0,8$ со среднеквадратичным отклонением $\sigma(E_{\text{выд}}) = 0,1 E_0$. Эта величина согласуется с полученными ранее поправками к $E_{\text{выд}}$, приведенными в Табл.2.

7. Особенности эксперимента с аппаратурой "Сокол-1"

7.1. Ограничительные условия для обработки данных эксперимента

Необходимость уменьшить роль "подсветки" ФЭУ при измерении ионизационным калориметром в приборе "Сокол-1" привела к ряду ограничительных условий при обработке материалов этого эксперимента.

Обработка была ограничена событиями, в которых первое взаимодействие частиц регистрировалось в двух первых рядах ИК, хотя это и снизило объем обрабатываемого статистического материала, а также привело к некоторым методическим затруднениям в определении реализуемой при наличии тока обратных частиц в калориметре эффективности регистрации.

Энергетические измерения ограничивались только одной из проекций ИК, содержащей всего 5 детектирующих рядов, и именно той, в которой геометрия регистрируемого события обуславливалась меньшим вкладом "подсветки" ("лучшая" проекция). Из рассмотрения исключались особо неблагоприятные по близости к ФЭУ события (на расстоянии менее двух детектирующих секций в обеих проекциях). Тем не менее, результаты измерений требовали учета вклада "подсветки".

Энергия, выносимая при регистрации события за пределы калориметра, могла быть учтена только в среднем из-за искажений, вносимых "подсветкой" в пространственное распределение энерго-

Таблица 2

Средние поправки в величину $E_{\text{выд}}$

Ядро	E_0 ТэВ	δ_1	δ_2	δ_3	δ	σ_δ
p	2-5	2,1	18,2	3,1	23,4	8,6
	> 5	2,5	25,0	1,1	30,3	11,0
α	2-5	2,5	13,7	5,9	23,1	7,1
	> 5	4,1	20,7	3,9	28,2	7,6
M	2-5	4,2	9,7	10,3	23,4	5,5
	> 5	4,6	13,7	6,0	24,8	5,0
H	2-5	4,7	8,6	12,3	24,5	5,69
	> 5	6,4	12,7	7,4	26,1	5,6
V H	2-5	7,3	5,4	15,1	26,4	5,0
	> 5	8,4	9,7	11,0	26,8	4,6

Примечание:

$\delta_i = I - E_0^{(i)}/E_0$, где E_0 - полная энергия; $E_0^{(i)}$ - полная энергия без учета только одного из факторов: $i = 1$ - вынос энергии через боковую поверхность ИК, $i = 2$ - вынос энергии через нижнее основание ИК, $i = 3$ - нерегистрируемая энергия; $\delta = I - E_{\text{изм}}/E_0$, где $E_{\text{изм}}$ - энерговыделение, σ_δ - среднеквадратичный разброс отношения $E_{\text{изм}}/E_0$.

выделения в калориметре.

7.2. Энергетические поправки

Оценка энергии, выносимой при регистрации частиц через нижнее основание ИК, была получена в результате анализа экспериментальных каскадных кривых и определения пробега поглощения энергии на выходе из калориметра. Для этой цели отбирались частицы, зарегистрированные в удаленной от ФЭУ в обеих проекциях ограниченной зоне ИК. Полученная усредненная по регистрируемым компонентам ($E_0 > 2 \text{ ТэВ}$) поправка к $E_{\text{выд}}$ составила коэффициент 1,16. Поправка на энергию, выносимую через боковые грани ИК, была выяснена позднее на основе изучения неискаженного "подсветкой" пространственного распределения энерговыделения в ИК по данным второго эксперимента (средний корректирующий коэффициент 1,03-1,04.). Учтены были и средние энергетические потери непосредственно в сцинтилляторах ИК (коэффициент 1,03). Индивидуальной для каждого из регистрируемых событий была лишь поправка, вводимая для учета нерегистрируемой энергии ядерных расщеплений (средний по компонентам коэффициент $\sim 1,1$ в области $E_0 > 2 \text{ ТэВ}$). Таким образом, отношение $E_0/E_{\text{выд}}$ составило в среднем величину $\sim 1,35$.

7.3. Инструментальные погрешности

Для оценки погрешности, вносимой измерением энерговыделения по показаниям только одной из проекций ИК, контролируемой пятью детектирующими рядами, были использованы уже упоминавшиеся распределения энерговыделения по рядам ИК, полученные по данным эксперимента для разных регистрируемых компонент. На этой основе было определено среднее отношение энерговыделения в ИК, определяемого по показаниям 5 рядов, к энерговыделению в ИК, определяемому по всем 10 рядам ИК. Для проекции X (ряды с нечетными номерами) это отношение составило в среднем $E_{\text{выд}}(x)/E_{\text{выд}} = 1,05$, для проекции Y (ряды четных номеров) - $E_{\text{выд}}(y)/E_{\text{выд}} = 0,97$. При равновероятности обеих проекций в качестве "лучших" средняя систематическая ошибка в определении энергии не превышает $\sim 1\%$. Однако, случайная погрешность индивидуального измерения составляет в этом случае $\pm 4\%$.

Это подтверждается и данными второго эксперимента. Полученное здесь для разных компонент распределение отношений парциальных энерговыделений E_x и E_y в соответствующих проекциях X и Y к полному $E_{\text{выд}}$ (рис. 10) приводит к следующим средним значениям ($E_0 > 2 \text{ ТэВ}$) - $E_x/E_{\text{выд}} = 0,52$, $E_y/E_{\text{выд}} = 0,48$, которые близки к предыдущим величинам $E_{\text{выд}}(x)/E_{\text{выд}} = 1,04$, $E_{\text{выд}}(y)/E_{\text{выд}} = 0,96$ (по определению - $E_{\text{выд}}(x) = 2E_x$; $E_{\text{выд}}(y) = 2E_y$).

Значительный вклад в случайные погрешности E_0 вносят в первом эксперименте флуктуации $E_{\text{выд}}$, поскольку выносимая за пределы ИК энергия учитывается здесь с помощью средней поправки. Средне-квадратичная величина разброса $E_{\text{выд}}$ при фиксированном значении E_0 оценивается по распределению $E_{\text{выд}}/E_0$, полученному в "чистых" измерениях второго эксперимента (рис. 6). Эта величина составляет $\sigma(E_{\text{выд}}) \approx 0,1 E_0$. (Для сравнения напомним, что погрешность в определении E_0 за счет индивидуальной поправки, учитывающей вынесенную энергию, оценивалась во втором эксперименте величиной $\sim 0,02 E_0$).

Принятая в обоих экспериментах дискретная шкала амплитудно-числовых измерений $E_{\text{выд}}$ обуславливает случайную погрешность измерений, составляющую, в среднем, 2-3%.

В инструментальную погрешность измерений входит и неточность наземной калибровки по мюонам и настройки на рабочий диапазон каждой из секций ИК. Эта неточность составляет $\sim 5\%$ в первом приборе и $\sim 10\%$ - во втором. Она приводит, с учетом среднего распределения энерговыделения по рядам и секциям ИК, к систематической погрешности в определении $E_{\text{выд}}$ $\sim 2-3\%$ в первом случае и $\sim 5\%$ - во втором.

Систематическую погрешность $\sim 5\%$ может составить и ограниченная точность принятых расчетных коэффициентов, учитывающих переходные эффекты поглотитель-сцинтиллятор в ИК.

В целом, указанные инструментальные ошибки измерений составляют случайную погрешность в определении $E_0 \sim 11\%$ в первом эксперименте, $\sim 4\%$ - во втором и систематическую погрешность в пределах $\sim 10\%$ в обоих экспериментах. Однако, для первого экс-

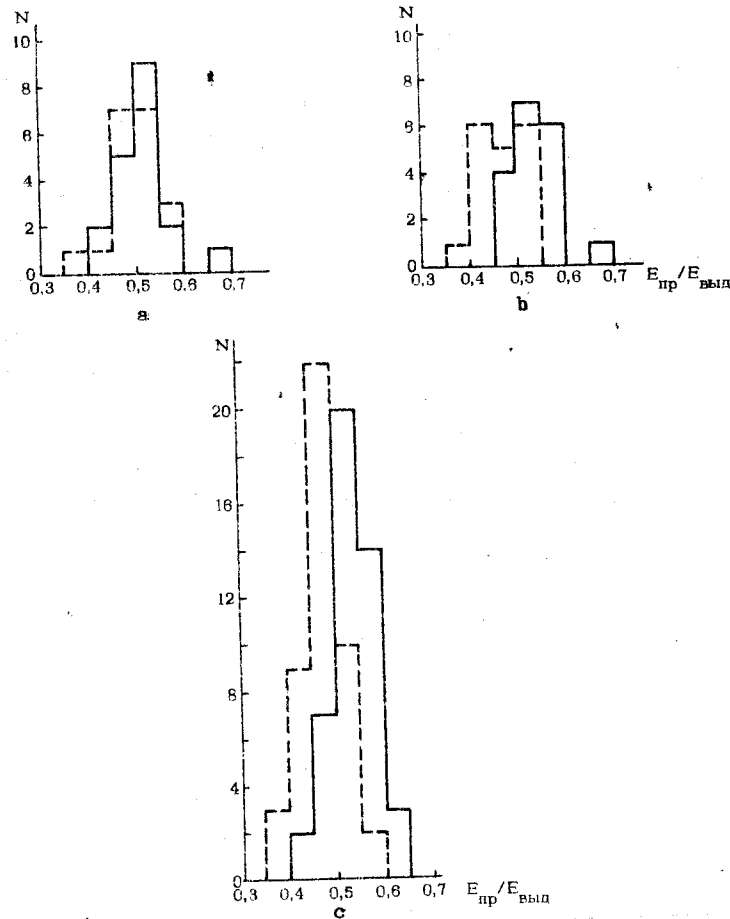


Рис. 10. Распределение отношений парциального энерговыделения в одной проекции ИК к полному для частиц, зарегистрированных с взаимодействием в верхних трех рядах ИК ("Сокол-2"): сплошная линия - $E_{\text{пр}}/E_{\text{выд}}$, пунктирная - $E_{\text{пр}}/E_{\text{выд}}$: а - для протонов, б - α -частиц, в - ядер с $Z > 2$

перимента следует еще учесть ошибки, связанные с "подсветкой" ФЭУ.

7.4. Погрешности, вносимые "подсветкой" ФЭУ ("Сокол-1")

Для выяснения этого вопроса был использован следующий метод. Пространственное распределение энерговыделения в ряду ИК (в максимуме развития каскада) по данным "лучших" проекций ИК в эксперименте "Сокол-1" сравнивалось с аналогичным распределением по данным эксперимента "Сокол-2", где не было эффекта "подсветки" (рис. 11). В другом варианте вклад "подсветки" определялся сравнением пространственных распределений событий, максимально приближенных к ФЭУ, с наиболее удаленными из числа зарегистрированных в самом приборе "Сокол-1". Сопоставление производилось следующим образом.

Если F - распределение, наблюдаемое в отсутствии "подсветки", f - распределение, обусловленное "подсветкой" (F и f нормированы), $(F + Kf)$ - распределение, регистрируемое в общем случае (при наличии "подсветки"), то оценка отношения измененного значения энерговыделения $E_{\text{изм}}$ с вкладом "подсветки" к истинному $E_{\text{выд}}$ может быть получена из выражения

$$E_{\text{изм}}/E_{\text{выд}} = 1 + K \gg \left(\frac{\sum (F + Kf)}{(F + Kf)_{\text{макс}}} \right) : \left(\frac{\sum F}{F_{\text{макс}}} \right),$$

где суммирование энерговыделений производится по всем секциям данного ряда, а величины $(F + Kf)_{\text{макс}}$ и $F_{\text{макс}}$ относятся к секциям с максимальным энерговыделением.

В обозначениях $\eta_1 = \sum (F + Kf) / (F + Kf)_{\text{макс}}$ и $\eta_2 = \sum F / F_{\text{макс}}$ нижняя оценка вклада "подсветки" K_H в энерговыделение в данном ряду ИК может быть выражена равенством $K_H = \eta_1 / \eta_2 - 1$.

В табл. 3, 4 приведены значения η_1 , η_2 , полученные по данным экспериментов "Сокол-1" и "Сокол-2" для протонов. В табл. 5

приведены оценки K_H , полученные сравнением данных первого эксперимента со вторым, а также в рамках экспериментальных данных самого эксперимента "Сокол-1" (отмечены знаком $\times$).

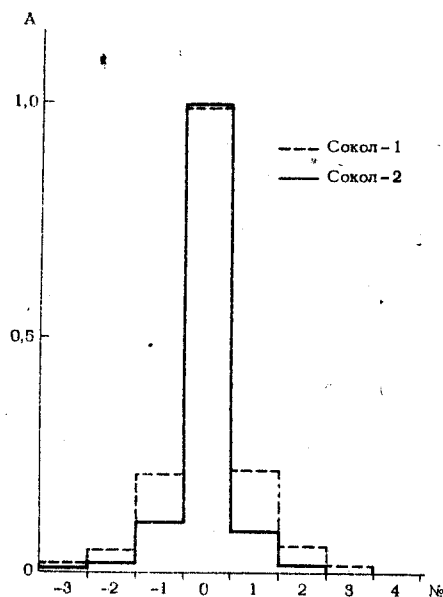


Рис. II. Типичное распределение регистрируемого энерговыделения по секциям в ряду ИК в первом и втором экспериментах (распределения нормированы в максимуме)

Таблица 3

Значения параметра η_1 в разных энергетических интервалах $E_{\text{выд}}$ по данным эксперимента "Сокол-1" для протонов

Энергетический интервал, ТэВ	1,4 - 2,8	2,8 - 6	≥ 6
$\langle E_{\text{выд}} \rangle$, ТэВ	2	4,2	12,3
Число обработанных событий	52	47	11
η_1	$1,46 \pm 0,05$	$1,39 \pm 0,04$	$1,52 \pm 0,12$

Таблица 4

Значения параметра η_2 в разных энергетических интервалах $E_{\text{выд}}$ по данным эксперимента "Сокол-2" для протонов

Энергетический интервал, ТэВ	1,4 - 2,8	2,8 - 6	≥ 6
$\langle E_{\text{выд}} \rangle$, ТэВ	2	4,2	12,3
Число обработанных событий	85	38	9
η_2	$1,25 \pm 0,02$	$1,22 \pm 0,02$	$1,22 \pm 0,05$

Таблица 5

Вклад "подсветки" K_H в энергоизмерения при регистрации протонов в эксперименте "Сокол-1"

$\langle E_{\text{выд}} \rangle$, ТэВ	2	2,6	4,2	7	11,7	12,3
K_H	$0,17 \pm 0,044$	$0,07^x \pm 0,04$	$0,14 \pm 0,04$	$0,15^x \pm 0,11$	$0,19^x \pm 0,04$	$0,25 \pm 0,11$

Примечание: среднее значение по данным табл. 5 составляет $\langle K_H \rangle_p = 0,15 \pm 0,02$.

Вместе с тем, представленные на графике рис. 12 значения K_H допускают (в рамках метода максимального правдоподобия) зависимость K_H от $E_{\text{выд}}$ ($E_{\text{выд}} > 2,5$ ТэВ) в форме $K_H = C(1 - e^{-E_{\text{выд}}/\epsilon})$; $C = 0,2 \pm 0,04$, $\epsilon = 4,5 \pm 0,5$ ТэВ. (Выброс за пределы ошибок этой аппроксимации K_H в области $E_{\text{выд}} < 2$ ТэВ может свидетельствовать о том значении, какое имеет "подсветка" ФЭУ вблизи порога регистрации).

Уточним, далее, величину вклада "подсветки" K с тем естественным предположением, что максимальное значение "подсветки", $f_{\text{макс}}$, коррелирует с максимумом энерговыделения $F_{\text{макс}}$ в ряду: $(F + Kf)_{\text{макс}} = F_{\text{макс}} + Kf_{\text{макс}}$. Тогда $(1 + K_H) = \frac{\sum(F + Kf)}{\sum F} = \frac{F_{\text{макс}}}{(F + Kf_{\text{макс}})} = \frac{1 + K}{1 + Kf_{\text{макс}}/F_{\text{макс}}}$. Отсюда $K/K_H = [1 - (1 + K_H) f_{\text{макс}}/F_{\text{макс}}]^{-1}$.

Величину $f_{\text{макс}}/F_{\text{макс}}$ можно соотнести с отношением σ_{x2}/σ_{x1} , где σ_{x1} - среднеквадратичное отклонение в пространственном распределении f для вторичных частиц, инициирующих "подсветку" ФЭУ в ряду ИК "Сокол-1", σ_{x2} - среднеквадратичное отклонение в пространственном распределении F энерговыделения в ряду ИК "Сокол-2".

По оценке, полученной для протонов ($E_{\text{выд}} > 2$ ТэВ), на основании анализа различий K_H при разном отстоянии ливневой оси от "подсвечиваемых" ФЭУ, $\sigma_{x1} \approx 2,9$ (в единицах ширины секций в ряду ИК), тогда как $\sigma_{x2} \approx 0,8$. Используя эти данные и полагая $f_{\text{макс}}/F_{\text{макс}} \approx \sigma_{x2}/\sigma_{x1}$, получим, в соответствии с предыдущим, $K/K_H = 1,5 \pm 0,1$.

Таким образом, средний по диапазону измерений энергетический вклад "подсветки" при использовании "лучших" проекций ИК для регистрируемых протонов составляет величину $\langle K \rangle_p = \langle K_H \rangle_p \cdot (1,5 \pm 0,1) = 0,23 \pm 0,03$, и соответствующий поправочный коэффициент к энергетической шкале равен $\langle P \rangle_p = (1 + K_H)^{-1} = 0,81 \pm 0,02$.

Если принять во внимание зависимость K_H от $E_{\text{выд}}$ для протонов в области $E_{\text{выд}} > 2,5$ ТэВ в форме приведенной ранее аппроксимации, то $P = [1 + (0,3 \pm 0,06)(1 - e^{-E_{\text{выд}}/4,5})]^{-1}$; это дает

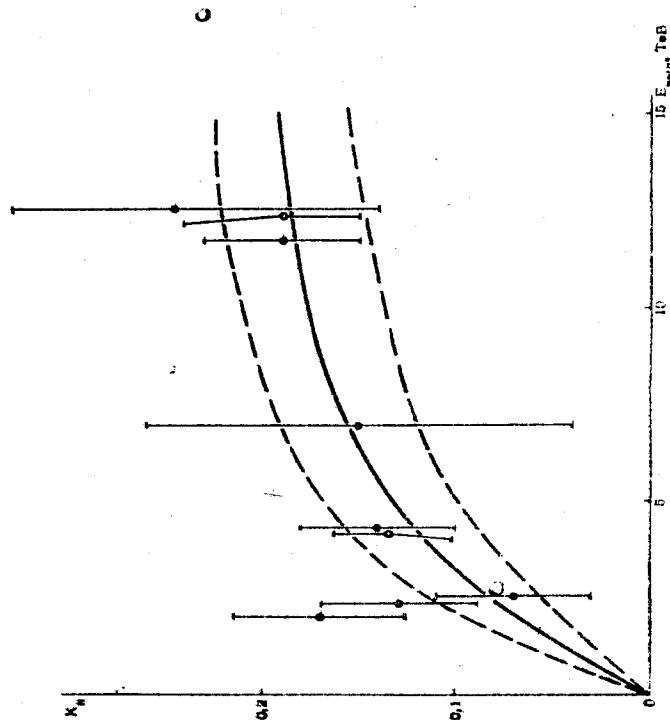


Рис. 12. Относительная величина K_H - вклада "подсветки" ФЭУ в энерговыделение при регистрации протонов (•) и $\times$ - частиц (•) в зависимости от $E_{\text{выд}}$ ("Сокол-1"); сплошная кривая - аппроксимация зависимости K_H от $E_{\text{выд}}$ в форме $K_H = 0,2(1 - e^{-E_{\text{выд}}/4,5})$; пунктир - ошибка аппроксимации

для $E_{\text{выд}} = 3 \text{ ТэВ}$ поправку $\Pi = 0,86 \pm 0,03$; для $E_{\text{выд}} = 10 \text{ ТэВ}$ - $\Pi = 0,79 \pm 0,03$. Такая зависимость $\Pi(E_{\text{выд}})$ приводит к укрупнению спектра протонов в этой области на $\Delta \delta \approx -0,07$.

В табл. 6 и 7, аналогично предыдущим, приводятся параметры η_1 и η_2 , характеризующие распределение энерговыделения в ряду ИК при регистрации α -частиц; в табл. 8 - соответствующие оценки K_H для "вклада" "подсветки" в энерговыделение.

Таблица 6

Значения параметра η_1 в разных энергетических интервалах $E_{\text{выд}}$ по данным эксперимента "Сокол-1" для ядер He

Энергетический интервал, ТэВ	2 - 2,8	2,8 - 6	≥ 6
$\langle E_{\text{выд}} \rangle$, ТэВ	2,3	4,2	12,3
Число обработанных событий	52	51	29
η_1	$1,49 \pm 0,05$	$1,40 \pm 0,03$	$1,47 \pm 0,06$

Таблица 7

Значение параметра η_2 в разных энергетических интервалах $E_{\text{выд}}$ по данным эксперимента "Сокол-2" для ядер He

Энергетический интервал, ТэВ	2 - 2,8	2,8 - 6	≥ 6
$\langle E_{\text{выд}} \rangle$, ТэВ	2,3	4,2	12,3
Число обработанных событий	47	41	20
η_2	$1,32 \pm 0,02$	$1,23 \pm 0,02$	$1,23 \pm 0,03$

Таблица 8

Вклад "подсветки" K_H в энергоизмерение при регистрации ядер He в эксперименте "Сокол-1"

$\langle E_{\text{выд}} \rangle$, ТэВ	2,3	4,2	12,3
K_H	$0,13 \pm 0,04$	$0,14 \pm 0,03$	$0,20 \pm 0,06$

Данные табл. 7 приведены на графике рис. 12 в функции $E_{\text{выд}}$. Среднее значение вклада "подсветки" по диапазону измере-

ний составляет здесь: $\langle K_H \rangle = 0,14 \pm 0,02$.

С учетом отношения K/K_H для α -частиц, совпадающего, в пределах ошибок, с аналогичной величиной для протонов, средний по диапазону вклад "подсветки" в результат энергетических измерений по "лучшим" проекциям ИК составляет здесь $\langle K \rangle = 0,22 \pm 0,04$ со средним поправочным коэффициентом к энергетической шкале $\langle P \rangle = (1 + K_{\alpha})^{-1} = 0,82 \pm 0,03$.

Аналогично были получены значения η_1, η_2, K_H для групп ядер M, H, VH. Полученные оценки K_H не обнаруживают здесь заметной систематической зависимости от $E_{\text{выд}}$, а средние по диапазону энергоизмерений значения для каждой из групп ядер оказываются близкими (табл. 9).

Таблица 9

Вклад "подсветки" K_H в энергоизмерения при регистрации ядер групп M, H, VH в эксперименте "Сокол-1"

Группа ядер	M	H	VH
K_H	$0,16 \pm 0,01$	$0,13 \pm 0,02$	$0,14 \pm 0,03$

Усредняя эти данные, получаем среднее значение K_H для вклада "подсветки" при регистрации ядер $Z > 2$: $\langle K_H \rangle_{Z>2} = 0,15 \pm 0,01$. По полученным данным для $Z > 2$ $\sigma_{x1} = 3,7$; $\sigma_{x2} \approx 1$. Пользуясь ими, приходим к отношению K/K_H , аналогичному предыдущим: $K/K_H = 1,45 \pm 0,01$.

Отсюда определяется средний относительный вклад "подсветки" в энергоизмерения ядер $Z > 2$ по "лучшим" проекциям ИК: $\langle K \rangle_{Z>2} = 0,22 \pm 0,015$. Поправочный коэффициент к энергетической шкале для ядер $Z > 2$, зарегистрированных прибором "Сокол-1", должен составлять, таким образом, $\langle P \rangle_{Z>2} = 0,81 \pm 0,02$.

Средний вклад "подсветки" K_H в энергоизмерения прибором "Сокол-1" при регистрации различных компонент излучения во всех случаях оказывается близким к значению $K = 0,22 - 0,23$. Поправочный коэффициент к результатам энергоизмерений по "лучшим" проекциям ИК при регистрации всех компонент прибором "Сокол-1" может быть принят в среднем равным

$$\langle P \rangle = 0,81 \pm 0,02.$$

"Подсветка" ФЭУ вносит, таким образом, систематическую погрешность в энергоизмерения, составляющую, в среднем, величину $K = 0,22 - 0,23$ от $E_{\text{выд}}$. Эта погрешность может быть учтена (с точностью $\sim 2,5\%$) коэффициентом $\langle \Pi \rangle$, который, вместе с отношением $E_0/E_{\text{выд}} = 1,35$, приводит к определению $E_0 = 1,09 E_{\text{изм}}$.

Однако, значительные флуктуации вклада "подсветки" со среднеквадратичным отклонением величины K , равным $\sigma_K = 0,17$, приводит при этом к случайным погрешностям, составляющим $\sim 14\%$ от измеряемого значения энерговыделения в ИК для регистрируемой частицы.

В итоге, инструментальные погрешности, вносимые "подсветкой", в сумме с другими (п. 7.3) дают результирующую случайную погрешность $\sim 18\%$ и систематическую - в пределах $\sim 12\%$ в измерениях энергии регистрируемого события ("Сокол-1").

Литература

- I. Sloan F., Ellsworth R.W. et al. Nucl. Instr. and Meth., v.167, no.3, p.371, 1979.