

A 01.04.16
T-35

На правах рукописи

ТЕР-АНТОНЯН САМВЕЛ ВЛАДИМИРОВИЧ

ПРОСТРАНСТВЕННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОННОЙ И ВЫСОКОЭНЕРГИЧНОЙ АДРОННОЙ КОМПОНЕНТ
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА УРОВНЕ ГОР ПРИ ПЕРВИЧНЫХ
ЭНЕРГИЯХ 10^{14} - 10^{16} эВ

(Ц.04.16 - физика ядра, элементарных частиц
и космических лучей)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Ереван - 1995

Работа выполнена в Ереванском Физическом Институте

Официальные оппоненты:

Доктор физ.-мат. наук, профессор

А.А. Петрухин (МИФИ, Москва)

Доктор физ.-мат. наук

В.И. Яковлев (ФИАН РФ, Москва)

Доктор физ.-мат. наук

К.А. Испирян (ЕрФИ, Ереван)

Ведущая организация: Институт ядерных исследований
АН РФ, Москва.

Защита состоится "15" сентября 1995 г. в 14 часов

на заседании Специализированного Совета

"Физика ядра и элементарных частиц"

Ереванского Физического Института

по адресу: 375036 Ереван, ул. Братьев Аликханян 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке

Ереванского Физического Института

Автореферат разослан "15" ноября 1995 г.

Ученый секретарь

Специализированного Совета

кандидат физ.-мат. наук

С.И.Г.

А.Г. Маркрян

72-96

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Работа посвящена исследованию энергетического спектра адронов в широком интервале энергий $1+100$ ТэВ, включающем одиночные адроны и адронные группы с энергиями $1+10$ ТэВ и адроны в составе ШАА с энергиями $1+100$ ТэВ. Соответствующий энергетический спектр первичных космических лучей ответственных за наблюдаемые адроны распределен в интервалах $1+100$ ТэВ для одиночных адронов и 10^2+10^5 ТэВ для адронов в ШАА с числом частиц 10^5+10^7 . Именно внутри этих областей обнаружены изломы в поведении энергетических спектров (протоны при $E \leq 4$ ТэВ [Григоров Н. и др., Зацепин В.И. и др.], указания на излом протонов при $E \approx 40$ ТэВ и 100 ТэВ [коллорабация JASCE], ядра при $E/Z \approx 3 \cdot 10^3$ ТэВ), трудно объяснимых с астрофизической точки зрения.

Непосредственно с энергией первичных ядер коррелирует полное число частиц в ШАА на уровне гор, а распределение по возрастам ШАА коррелирует с химическим составом, недоступным прямым измерениям при энергиях более 10^{15} эВ.

Актуальность ядернофизического аспекта исследований функций пространственного распределения электронной и высокоэнергичной адронной компонент ШАА на высоте гор, связана с нерешенными проблемами в поведении поперечных импульсов вторичных адронов в неупругих актах ядро-ядро взаимодействий при первичных энергиях $10^{15}+10^{16}$ эВ, недостижимых на современных ускорителях по крайней мере в ближайшие 10 лет. Кроме этого, несмотря на то что энергии коллайдеров подошли к области 10^{15} эВ, взаимосвязь между экспериментами на встречных пучках и в космических лучах дополняют друг друга в связи с тем, что фрагментационная часть спектра вторичных частиц в ускорительных экспериментах ($x > 0.1$) практически недоступна для регистрации, тогда как в экспериментах "АНИ-83" и "Макет-АНИ" применяются такие методы как ионизационные калориметры, позволяющие получать информацию именно о фрагментационной части спектра.

Цель настоящей работы заключалась в -

- определении абсолютного энергетического спектра адронов и адронных групп с энергиями более 1 ТэВ на уровне гор;

- определении функций пространственно о распределения адронов в ШАА по результатам эксперимента "АНИ-83" и измерений энергетического спектра и ФПР адронов в ШАА в эксперименте "Макет-АНИ" в интервале числа частиц 10^5+10^7 ;

- измерении спектра ШАА по числу частиц, N -в корреляций и функций пространственного распределения электронов в ствольной области ШАА на уровне гор на установке "Макет-АНИ";

- интерпретации полученных результатов в свете современных моделей взаимодействия и гипотез о спектре и составе первично-

го космического излучения.

Основные результаты, представленные к защите.

По методике обработки экспериментальных данных:

- * комбинированный метод восстановления параметров ШАА и многоствольных ШАА, основанный на методах преобразования пространства измерений, минимизации χ^2 и максимального правдоподобия;
- * метод измерения угловых координат стволов ШАА, основанный на автокалибровке установки по распределениям парных fast-timing задержек между сцинтилляторами;
- * метод обработки информации с рентгено-эмульсионных экспериментов, основанный на дифференциальном анализе пятен потемнений на эмульсионных пленках и абсолютной калибровке точностей по распадам $\pi^+ \rightarrow 2\gamma$.

По результатам измерений потока адронов и ШАА на уровне гор при первичных энергиях $1+10^4$ ТэВ:

- * Абсолютный энергетический спектр и зенитно-угловое распределение адронов и адронных групп в интервале энергий $1+7$ ТэВ. Заключение о согласии наблюдаемого спектра адронов с предсказаниями теории кварк-глюонных струн (КГС) и отсутствии излома в энергетическом спектре первичных протонов в интервале энергий $1+200$ ТэВ;
- * Энергетический спектр и функция пространственного распределения адронов в ШАА при энергиях адронов $1+100$ ТэВ и числе частиц в ШАА $10^4 \div 5 \cdot 10^6$. Выводы о необходимости учета функций ошибок измерений пространственных параметров ШАА и адронов, снимающих наблюдаемые противоречия между предсказаниями теории КГС и экспериментальными данными;
- * Интегральный спектр ШАА по числу частиц. Зависимость места излома спектров от параметра возраста ШАА, указывающая на противоречия между традиционной гипотезой излома энергетического спектра первичных космических лучей и наблюдаемым изломом спектров ШАА по числу частиц.

Новизна основных результатов диссертации.

- * Точность измерения абсолютного энергетического спектра адронов превосходит точности аналогичных экспериментов более чем в два раза.
- * Получена оценка $\sigma_{N-Air}^{in}(E)$ в интервале энергий $1+30$ ТэВ из показателя спектра адронов ТэВ-ных энергий на уровне гор.
- * На основе абсолютного энергетического спектра адронов доказано отсутствие излома в энергетическом спектре первичных протонов в интервале энергий $1+200$ ТэВ.
- * Абсолютный энергетический спектр адронных групп в зависимости от числа адронов в группах при энергиях $1+10$ ТэВ.
- * Снята необходимость предположений о быстром росте попе-

речных импульсов вторичных адронов при энергиях $\approx 10^{15}$ эВ учетом функций ошибок при восстановлении пространственного распределения адронов ТэВ-ных энергий в ШАА.

- * Получена корреляция места излома спектров ШАА по числу частиц и параметра возраста ШАА.
- * Получена зависимость показателя интегрального спектра ШАА по числу частиц от параметра возраста ливней в области до и после излома.

* Распределение параметра возраста ШАА при $N_e > 10^6$ и $s > 1.2$ носит аномальный характер.

* Показано, что результаты измерений $\sigma_{jet}^{p-p}(p_{jet} > 10 \text{ ТэВ/с}, E > 10^{15} \text{ эВ})$ по интенсивности многоствольных ШАА на уровне гор более чем на порядок превышают экстраполяции ускорительных данных.

* Разработан дифференциальный метод анализа растров потемнений, вызванных высокоэнергичными семействами γ -квантов на рентгено-эмульсионных пленках.

Научная и практическая ценность работы.

Полученные абсолютные энергетические спектры адронов и адронных групп в интервале энергий $1+10$ ТэВ на уровне гор дают возможность уточнить известную в настоящее время гипотезу об изломах в энергетических спектрах первичных протонов в интервале энергий $3+200$ ТэВ.

Представленные экспериментальные данные, аппроксимации энергетических спектров, функции пространственного распределения адронов в ШАА и спектры адрон-содержащих ШАА при энергиях адронов $E > 1$ ТэВ дают возможность выявить особенности ядрон-ядерных взаимодействий при энергиях более 10^{15} эВ.

Разработанный метод обработки информации с рентгено-эмульсионных экспериментов позволяет наряду с повышением точности измерений отказаться от применения двойного слоя пленок, что значительно упрощает экспериментальный процесс и экономит средства и ресурсы.

Методы обработки результатов экспериментов по исследованию ШАА и адронов в ШАА, разработанные в работе, могут быть использованы в действующих установках ("EAS-TOP", "KASCAD", "CASA-MIA", "Адрон") и при планировании экспериментов ("АНИ").

Вклад автора.

Приведенные в диссертации методы обработки результатов экспериментов разработаны автором. Обработка результатов эксперимента установки "Пион", рентгеновских пленок эксперимента "Памир", модернизация эксперимента "Макет-АНИ" и эксплуатация в режиме набора экспериментальных данных установки "Макет-АНИ" проведены под руководством автора диссертации. Обработки экспериментальных данных установок "АНИ-83" и

"Макет-АНИ", теоретические расчеты и интерпретации результатов проведены автором диссертации.

Апробация работы и публикации.

Результаты диссертации докладывались на Всесоюзных (1982-1990гг) конференциях и Московской международной конференции (1994г) по космическим лучам. Были представлены на Международных конференциях (Bangalore-1983, La Jolla-1985, Adelaide-1990, Dublin-1991, Rome-1995), Европейском симпозиуме по космическим лучам (Belaton-1990). Докладывались на семинарах ЕФИ, Бюраканской Астрофизической Обсерватории, ФИРАН, ИЯИ, НИИЯФ ИГУ.

По результатам работы под со-руководством автора защищены две кандидатские диссертации.

Результаты диссертации опубликованы в 37 научных статьях.

Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из 199 страниц и включает в себе введение, 6 глав, заключение и список литературы.

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведены описание экспериментов "Пион", "АНИ-83" (Рис. 1) и "Макет-АНИ" (Рис. 2). Результаты диссертации по этой главе опубликованы в работах [1+5, 34, 35].

Во второй главе приводятся методические исследования в области обработки экспериментальных данных.

В начале рассмотрена общая постановка задачи теории обработки информации с установок по исследованию космических лучей высоких энергий. На основе аппроксимации ядерно-каскадных кривых в железном поглотителе

$$\frac{\partial E}{\partial t} = E \cdot \frac{1}{t_0} \cdot \frac{e^{-\delta^2/2}}{\sqrt{2\pi} \cdot \delta} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln(t/t_0)}{\delta}\right]^2\right\} \quad (1)$$

($t_0 = \omega \cdot T_0 \cdot \ln(E/\beta)$; β - критическая энергия в веществе поглотителя; $\delta^2 \approx \ln(2)$ и $\omega = 0.95 \pm 0.05$ - аппроксимационные параметры; E - энергия адрона в единицах ГэВ; $T_0 = 13.9$ г/см² - радиационная единица длины в железе), разработана методика оценки нерегистрируемой (проноса) энергии каскада в калориметре и идентификации адронных каскадов в проекциях установки.

Приведены разработанные методы восстановления параметров МАА, позволяющие получать несмещенные и эффективные оценки параметров: N_e - число частиц в МАА, s - возраст ливня, x_0, y_0 - координаты пересечения ствола МАА с плоскостью наблюдения, θ и φ - зенитный и азимутальный углы МАА. Методы основаны на применении преобразования пространства измеряемых величин n_i (число частиц в i -ом детекторе), которая исключает зависимость

функционала χ^2 от числа частиц в МАА (N_e), а зависимость χ^2 от параметра возраста (s) при этом становится линейной.

Найденное преобразование определяется оператором

$$\ln n_i = \ln(n_i) - \langle \ln(n_i) \rangle, \quad (2)$$

где $\langle \ln(n_i) \rangle = \sum \ln(n_i) / m$. Соответствующее преобразование теоретической функции Нишимуры-Каматы-Грейзена (НКГ) не зависит от N_e и линейно зависит от параметра s , что позволяет, решая уравнение минимизации χ^2 относительно параметров x_0 и y_0 , получить аналитическое решение для параметра s -

$$s = \frac{\sum ((Lz_i + L(1+z_i)) (Ln_i + 2Lz_i + 4.5L(1+z_i)) - Ls_i) / \sigma_i^{*2}}{\sum ((Lz_i + L(1+z_i)) / \sigma_i^{*2})}, \quad (3)$$

где $z_i = r_i / r_M$, S_i - площадь сцинтилляторов, а $(\sigma^*)^2$ - дисперсия измеряемой в эксперименте величины $\ln n_i$.

Значение оценки полного числа частиц определяется методом максимального правдоподобия из выражения

$$\ln(N_e) = \sum_i^m (\ln(n_i / \sigma_i) / \sigma_i^2) / \sum_i^m (1 / \sigma_i^2). \quad (4)$$

используя приближение лог-нормальности ошибок измерения числа частиц в сцинтилляторах.

Во второй главе приведена также новая концепция обработки информации с рентгено-эмульсионных пленок, основанная на принципе максимального правдоподобия для измеренной на микроденситометре матрицы плотностей потока электронов $[\rho_{ij}]$ при известной, но фиксированной матрице параметров

$$[\Phi] \equiv (E_1, \dots, E_{n_\gamma}, x_1, \dots, x_{n_\gamma}, y_1, \dots, y_{n_\gamma}, \theta, \varphi).$$

Функция правдоподобия представлена в виде

$$\Phi([\rho_{ij}] | [\Phi]) = \prod_{i=1}^{N_i} \prod_{j=1}^{N_j} f_k(n_{ij} | [\Phi]), \quad (5)$$

где $n_{ij} = \rho_{ij} \cdot a$ - число эквивалентных электронов, зарегистрированных в ячейке сканирования (i, j) ; $a = \Delta x \cdot \Delta y$ - площадь ячейки; N_i, N_j - соответствующее число ячеек сканирования по осям X и Y на плоскости пленки; $f_k(n_{ij} | [\Phi])$ - вероятность того, что в ячейке (i, j) регистрируется n_{ij} электронов при данной матрице параметров $[\Phi]$; параметр $k=1$.

если $n_{ij} \leq n_{min}$, $k=0$, если $n_{ij} < n_{min}$, $k=2$, если $n_{ij} \geq n_{min}$.

Определение элементов матрицы [Ф] проводится численно минимизацией отрицательного логарифма функции правдоподобия

$$\Omega_0 = \min [-Lr^k([\rho_{ij}] | \Phi_{n\gamma})] \quad (6)$$

Апробация данного метода оценки параметров для $n_{\gamma} \leq 10$ проведена как на моделированных растрах от γ -квантов с энергиями $E_{\gamma} > 2$ ТэВ, так и на реальных пятнах потемнений от высокоэнергичных γ -квантов, предоставленных нам экспериментом "Пионер".

Результаты главы опубликованы в работах [6+20]

В третьей главе приведена методика теоретических расчетов методом моделирования диффузии первичного космического излучения через атмосферу, необходимых для интерпретации результатов экспериментов.

Основой расчетов служила программа моделирования ШАА с энергиями $E=10^2+10^5$ ТэВ, разработанная в ФИАН, и любезно предоставленная нам авторами А.Д.Ерлыкиным и Т.В.Даниловой.

Усовершенствование методики расчетов позволило нам начать исследование с первичных энергий 1 ТэВ и получить ожидаемые потоки адронов и адронных групп, регистрируемых установкой "Пионер". Кроме этого, включение в расчеты фрагментации ядер в первичных актах взаимодействия, уточнение инклюзивных спектров вторичных частиц по модели КГС (А.Д. Кайдалов, К.А. Тер-Мартirosян, Ю.М. Шабельский) и расчеты электронно-фотонных каскадов от γ -квантов по современным аппроксимациям из работ А.А. Лагутина, В.В. Учайкина и др. привели к более корректным результатам по функциям пространственного распределения компонент ШАА на уровне наблюдения (700 г/см²), что было необходимо для интерпретации результатов экспериментов "АНИ-83" и "Макет-АНИ".

Первичный энергетический спектр моделировался в предположении "резкого излома" с показателями $\gamma=2.65$ при $E < E_k$ и $\gamma=3.1$ при $E > E_k$. Энергия излома спектра была выбрана $E_k = 3 \cdot 10^{15}$ эВ. В качестве альтернативного энергетического спектра в расчетах ШАА был использован дифференциальный спектр (Peters B.) с зависимостью энергии излома E_k от заряда первичного ядра Z_i сорта (i): $E_k = Z_i R_c$, где $R_c \approx 3000$ ТэВ - магнитная жесткость единичного заряда в Галактике. Доля ядер определялась согласно традиционным "нормальным" (Николевский С.И.) и "тяжелым" (эксперимент JACEE) составом космических лучей.

Результаты теоретических расчетов и сравнительный анализ с экспериментальными данными приведены в работах [21+29].

В главе IV приведены результаты абсолютного энергетического спектра и углового распределения адронов и адронных групп

на уровне гор в интервале энергий 1+10 ТэВ. Результаты получены из экспериментальных данных установки "Пионер" и приводятся в сравнении с теоретическими расчетами.

Исследование абсолютного энергетического спектра адронных групп было проведено по результатам эксперимента "АНИ-83".

Функциональная зависимость между падающим и регистрируемым потоком адронов определялась выражением

$$Z^*(n, E) = T \cdot S \int_0^{\theta_{max}} \sum_{n=m}^{M_{max}} Z(n, \theta, E) \cdot W(n, m, \theta, E) d\Omega \quad (7)$$

где $Z^*(n, E)$ - поток зарегистрированных групп с числом адронов в группе m и энергетическим порогом E , $Z(n, E)$ - поток групп из n адронов над установкой, $W(n, m)$ - вероятность регистрации m адронов из n , T и S - время наблюдения и площадь регистрации соответственно, $d\Omega \equiv d\cos\theta \cdot d\varphi$ - элемент телесного угла, $\theta_{max} = 40^\circ$ - предельный зенитный угол регистрации адронов. В выражении использовано приближение, согласно которому функция ошибок $W(n, m, \theta, E)$ слабо зависит от энергии адронов в группе.

Вычисление функции ошибок $W(n, m, E)$ было проведено методом Монте-Карло с максимальным приближением к реальной экспериментальной ситуации. В качестве энергетического спектра адронов была выбрана функция

$$Z(n, E) = \alpha_{en} \cdot (En)^{\gamma_{en}} / n \quad (8)$$

с размерностью (м⁻² · час⁻¹ · стер⁻¹), представляющая собой непрерывное продолжение интегрального энергетического спектра одиночных адронов. Значения параметров α_{en} и γ_{en} были получены методом минимизации χ^2 из уравнения (7).

На основе высокой точности полученного энергетического спектра адронов на уровне гор, аналитического решения уравнения диффузии первичного космического излучения через атмосферу и известного значения отношения потока нуклонов к адронам на уровне гор (Н.А. Григоров) получена оценка $\phi_{p-Air}^{in}(E)$, при энергиях $E > 1$ ТэВ.

Проведено сравнение наблюдаемого абсолютного спектра адронов с ожидаемыми значениями согласно модели КГС и различных гипотез о поведении энергетического спектра первичных ядер. Показано, что согласие теории с экспериментом достигается при первичном спектре ядер в аппроксимациях [Wiebel B.], [Ерлыкин А.], без изломов в энергетическом спектре протонов по крайней мере в интервале первичных энергий 1+200 ТэВ.

Результаты главы опубликованы в работах [20+28].

В главе V приведены функции пространственного распределения и энергетические спектры адронов в ШАА при $N_{\gamma} > 10$ и $E > 0.5$

ГэВ. Результаты получены из экспериментальных данных установок "АНИ-83" и "Макет-АНИ".

Для аппроксимации функции пространственного распределения использовалось экспоненциальное приближение, нормированное на полное число адронов с энергиями более E в ШАЛ с числом частиц более N_e .

Параметры аппроксимации определялись на основе минимизации функционала χ^2 с учетом ошибок измерения координат ствола ШАЛ, шток локализации центров адронных кластеров ионизаций, вероятностей регистрации адронов и ШАЛ. Согласие аппроксимационной функции с экспериментальными частотами наблюдалось в пределах двух стандартных отклонений. Анализ функции пространственного распределения (ФПР) адронов проведен в сравнении с теоретическими расчетами в приближениях суперпозиции и фрагментации ядер в первичных актах ядро-ядро взаимодействия.

На рис. 3 приведено пространственное распределение адронов, зарегистрированных в эксперименте для $N_e > 10^5$ и $E > 10^7$ ГэВ.

Там же приведены соответствующие аппроксимации для трех типов функций (экспоненциальная, функции А.Д.Ерлыкина и J. Kempa).

Проведен анализ полученных результатов по ФПР адронов в сравнении с аналогичными данными эксперимента на в/с Тянь-Шань (Нестерова Н.М.) и эксперимента "Памир" по $\langle rE \rangle - N_e$ корреляции.

Приводятся методика исследования адронов в ШАЛ, обработка данных и основные результаты по энергетическому спектру и ФПР адронов в ШАЛ эксперимента "Макет-АНИ".

Относительный дифференциальный спектр адронов $(\partial F / \partial E)$ в ШАЛ определяется из функционального уравнения

$$\frac{1}{Z(N_e)} \frac{\partial I}{\partial E^*} = \frac{1}{Z(N_e)} \int \frac{\partial F}{\partial E} g(E, E^*) \Omega(E, N_e) dE \quad (9)$$

где $Z(N_e)$ - интенсивность ШАЛ с числом частиц N_e , $\partial I / \partial E^*$ - измеренный спектр адронов, $g(E, E^*)$ - функция ошибок измерения энергии E ,

$$\Omega(E, N_e) = \int 2\pi r f(E, r, N_e) \omega(r) dr \quad (10)$$

вероятность регистрации адрона с энергией E при функции пространственного распределения адронов в ШАЛ $f(E, r, N_e)$ и вероятности регистрации энерговыделения адрона $\omega(r)$ на расстоянии r от ствола ШАЛ.

Функция $\Omega(E, N_e)$ рассчитана методом Монте-Карло с учетом ошибок измерения координат траекторий адронов и ствола ШАЛ и табулирована для различных E_i и $N_{e,j}$.

На рис. 4 приведены дифференциальные спектры адронов в ШАЛ, восстановленные согласно (9,10) и предположения о степенной

форме энергетического спектра адронов - $Z(\rangle E) \cong E^{-\gamma}$ для трех интервалов по N_e со средними значениями $\langle N_{e,j} \rangle = 1.7 \cdot 10^5, 5 \cdot 10^5,$

$1.5 \cdot 10^6$ (точки 1+3 соответственно). Линии на рис. 4 соответствуют результатам работ "Тянь-Шань" (непрерывная) и "АНИ-83" (пунктирная). Результаты эксперимента "Макет-Ани" ($\gamma = 1.4 \pm 0.04$) лучше согласуются со спектром адронов эксперимента "Тянь-Шань", имея ту же тенденцию выполаживания спектра с увеличением N_e . Однако, как показали оценки, проведенные методом

Монте-Карло, наблюдаемый эффект выполаживания спектра адронов объясняется слиянием ионизационных кластеров от различных адронов в ионизационных камерах установки.

Анализ интегральных энергетических спектров адронов в ШАЛ для различных значений параметра возраста ливней показал, что в пределах экспериментальных ошибок наклоны спектров не зависят от возраста. Отклонение от этого заключения спектра адронов в "зрелых" ливнях ($s \approx 1.1$) при малых $N_e \cong 10^5$ объяснимо

близкопороговыми эффектами. Для остальных ливней независимость показателя спектра от параметра возраста наблюдается в интервале числа частиц в ШАЛ $2 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^6$.

ФПР адронов в ШАЛ по данным эксперимента "Макет-АНИ" рассчитывалась с учетом измерения лишь одной проекции (x) расстояния адрона до ствола ШАЛ. При этом учитывались зенитно-угловое распределение, вероятности регистрации и функции ошибок измерения координат адронов и стволов ШАЛ. Соответствующая зависимость между наблюдаемыми частотами адронов в интервалах расстояний $x_i \rightarrow x_i + \Delta x$ до ствола ШАЛ с параметрами N_e, s, θ, φ ,

при функции пространственного распределения адронов $\rho(r) \cong \exp(-r(\theta, \varphi, x, y)/r_0)$

$$(11)$$

имеет вид

$$\frac{n_i}{\sum n_i} = \frac{1}{0} \int_{X_{min}^i}^{X_{max}^i} \int_{l}^{l+1} G(x^* | x, \sigma_x) dx^* W_x(x) \int_0^{Y_{max}^i} \int_{0.5}^1 \int_0^\pi \cos^7 \theta W_y(y) \rho(r) d\varphi d\cos\theta dy dx \quad (12)$$

где $W_x(x) \cong 1 - |x|/40$ м и $W_y(y) \cong 1 - |y|/Y_{max}$ - вероятности независимой регистрации адрона с координатой x и y , $G(x^* | x, \sigma_x)$ -

нормальное распределение ошибок измерения x -проекция расстояния адрона x^* до ствола ШАЛ; $X_{max}^i = 10$ м, $X_{min}^i = -10$ м, $Y_{max}^i = 6$ м - границы интегрирования, определяемые из критериев отбора; ρ - соответствующий нормировочный интеграл для частот наблюдения. Функции $W_x, W_y, \sigma_x(N_e, s)$ рассчитывались предварительно методом Монте-Карло с учетом эффективности ионизационных камер и ошибок измерения координат ствола ШАЛ.

Параметры характеристического радиуса r_0 (выражение 11) рассчитывались методом минимизации χ^2 с учетом ошибок измеренных частот и ширины интервалов разбиения, измеренных расстояний в x -проекции.

На рис. 5 приведены значения частот $W(x, E) = n_1 / \Sigma n_i$ для $E = 1, 2, 4$ и 8 ТэВ соответственно, при $\bar{N}_e = 2 \cdot 10^5$ (точки) и соответствующие аппроксимационные кривые.

Зависимости характеристического радиуса r_0 адронов от числа частиц в ШАА не обнаружено в интервале $N_e \in 10^5 \div 2 \cdot 10^6$.

Результаты опубликованы в работах [29-31, 37].

В главе VI проведено исследование пространственного распределения электронной компоненты ШАА и спектра ШАА по числу частиц в интервале $N_e \in 10^5 \div 10^7$.

Вначале приведены результаты по исследованию ошибок измерения числа частиц в сцинтилляторах, аппроксимация коррекции на переходной эффект в счетчиках и спектры числа электронов, зарегистрированных сцинтилляторами в сравнении с соответствующими расчетами методом Монте-Карло. Проведено исследование функции пространственного распределения электронов в ШАА по результатам $\approx 10^3$ часов работы установки "Макет-АНИ". Показано, что ФПР электронной компоненты ШАА описывается функцией НКГ в интервале расстояний от ствола ШАА (1-40 м). При этом флуктуации электронной плотности согласуются с пуассоновыми флуктуациями для интервала числа частиц в ШАА $10^5 \div 10^6$.

Далее, на основе банка данных ($\approx 10^3$ ч, $\approx 10^5$ событий ШАА, $5.2 \cdot 10^4$ удовлетворяли критериям отбора: $N_e > 5 \cdot 10^4$, $0.2 < s < 1.8$,

$|x| < 32$ м, $|y| < 18$ м, $\theta < 60^\circ$) методом минимизации χ^2 получен интегральный спектр ШАА по числу частиц.

Однородный интегральный спектр ШАА с учетом функции ошибок был рассчитан согласно приближению

$$Z(N_e, N, U_j) = \frac{1}{U} \sum_{k=1}^j u_k \cdot \frac{1}{V} \sum_{k=1}^j v_k / \Omega_k(\bar{s}_k) \quad (13)$$

где u_k и v_k - ожидаемая и зарегистрированная интенсивности ШАА с полным числом частиц N_e , принадлежащие интервалу группировки

$[U_k, U_{k+1})$, $\Omega_k(\bar{s}_k)$ - вероятность регистрации ливня с $N_e \in [U_k, U_{k+1})$ при среднем значении возрастов ливней в этом

интервале равном \bar{s}_k , $k=1, \dots, j$ - номер интервалов группировки экспериментальных данных по числу частиц в ШАА, U_k - границы

интервалов, u и v - соответствующие нормировки относительных спектров. Значения функции отклика установки $\Omega_k(N_e, s)$, рассчитаны методом Монте-Карло и табулированы для различных N_e и s . Восстановленные значения относительного интегрального спектра

ШАА ($Log(W) = Log((N_e / 10^6)^{1.5} \cdot Z(N_e))$) по числу частиц (N_e), согласно (13), для четырех интервалов по параметрам возрастов ливней приведены на рис. 6. Экспериментальные точки 1+4 соответствуют интервалам возрастов $0.2 \div 0.8$ ("молодые" ливни), $0.8 \div 1.2$ (ливни близки максимума развития), $1.2 \div 1.8$ ("старые" ливни) и $0.2 \div 1.8$ (все ливни) соответственно. Непрерывная и пунктирная линии соответствуют результатам Тянь-Шань (1987) и (1990) соответственно, нормированным в точке $N_e = 10^6$. Интенсивности $Z(N_e)$ нормированы на число ШАА, стволы которых пересекали регистрирующую площадь установки.

Из рис. 6 видно, что наряду с корреляцией наклонов спектров ШАА с параметром возраста s наблюдается сильная зависимость места излома спектров от значения возрастов ШАА при больших значениях s .

В главе рассмотрены распределения параметра возраста ливней для различных значений числа частиц в ШАА. Показано, что начиная с $N_e \approx 5 \cdot 10^5$ в распределениях возникает асимметрия в сторону увеличения возраста зарегистрированных ШАА, что в свою очередь увеличивает значение среднего возраста (\bar{s}) при возрастании N_e . Кроме этого, мода распределений уменьшается с возрастанием числа частиц в ШАА вплоть до $N_e \approx 5 \cdot 10^6$.

Полученные данные приведены в сравнении с соответствующими теоретическими расчетами, проведенными методом Монте-Карло, из чего следует, что для согласования наблюдаемых поведений спектров по числу частиц в ШАА в зависимости от параметра возраста с теорией необходимо включение дополнительного процесса быстрой диссипации энергии в первичных актах неупругих взаимодействий при энергиях $\approx 2 \cdot 10^{15}$ эВ.

Для двух интервалов по $N_e = (5 \cdot 10^4 \div 5 \cdot 10^5)$ и $(5 \cdot 10^5 \div 5 \cdot 10^6)$ приведены результаты эксперимента по s - $\sec(\theta)$ корреляции. Данные приближенно аппроксимируются линейной функцией вида $\bar{s} \approx A \cdot \sec(\theta) + s_0$, где значение наклона A зависит от числа частиц в ШАА (N_e).

Далее, на основе результатов экспериментов "АНИ-83" и "Макет-АНИ" по исследованию многостольных ливней на высотах гор проводится оценка сечения генерации жестких струй в первичных актах ядро-ядро взаимодействий. Метод основан на со-

отношении $\sigma_{jet}^{p-Air} / \sigma_{in}^{p-Air} \approx Z_1 / Z_0$, где Z_1 - интенсивность многоструйных ливней, Z_0 - полный поток ШАА на уровне наблюдения. При этом продольный импульс струи оценивается согласно приближению $x_{jet} \approx (N_1 / (N_1 + N_0))$, где N_0 и N_1 - полное число частиц в основном ливне и подстоле ШАА соответственно. Поперечный импульс струи рассчитывается из геометрического приближения $p_{1, jet} = E_1 \Delta R / h$, где $h = 6600 \text{ м} \cdot \ln(z_0 / (z_0 - \tau t_{0,1}))$ - высота зарождения подстола, зарегистрированного на глубине $z_0 = 700 \text{ г/см}^2$, $\tau = 37.2 \text{ г/см}^2$ - радиационная единица длины в воздухе, $t_{0,1}$ - глубины рождения основного ШАА и подстола в атмосфере, рассчитываемые на основе восстановленных значений возрастов s_0 и s_1 соответственно.

Верхняя граница доли сечения рождения струй $\sigma_{jet} / \sigma_{in}$ для взаимодействия первичное ядро-ядро атомов воздуха оказалось равным 6% ("АНИ-83") и 0.2% ("Макет-АНИ") при $p_1 > 50 \text{ ГэВ/с}$ и $E \approx 1.5 \cdot 10^6 \text{ ГэВ}$.

Результаты главы опубликованы в работах [32+34, 36].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе получены результаты по обработке экспериментальных данных многолетних прецизионных измерений на калориметре "Лион" абсолютного энергетического спектра адронов и адронных групп при энергиях адронов $1+10 \text{ ТэВ}$. На основе банка экспериментальных данных установки "АНИ-83" получены функция пространственного распределения адронов в ШАА для энергий адронов $E > 0.5 \text{ ТэВ}$ и числа частиц в ШАА $10^4 + 10^6$.

На экспериментальной установке "Макет-АНИ" проведены измерения характеристик электронной компоненты ШАА при числе частиц $10^4 + 10^6$, энергетического спектра и функции пространственного распределения адронов в ШАА при энергиях адронов $1+100 \text{ ТэВ}$.

Результаты экспериментов сравнивались с теоретическими расчетами, максимально приближенными к модели КГС для разных гипотез о поведении энергетического спектра и ядерного состава первичного космического излучения.

Основные результаты работы.

По методам обработки экспериментальных данных

* Метод "поворотных гистограмм", применяемый для восстановления траекторий адронов в адронных группах позволяет с высокой эффективностью определять координаты проекций траекторий адронов, причем точность метода улучшается с ростом числа адронов и ограничена лишь количеством и размерами детекторов.

* Ядернокаскадные ливни в железном поглотителе описываются аппроксимацией (1) при энергиях адронов $0.5+10 \text{ ТэВ}$, а их использование для экстраполяции нерегистрируемой энергии в калориметре позволяет получать несмещенные оценки энергии адронов в интервале $1+10 \text{ ТэВ}$.

* Метод восстановления параметров ШАА, основанный на преобразовании измеряемых значений показаний сцинтилляторов n_i в масштаб $\ln L_i \approx L m_i + \langle L m_i \rangle$, позволяет получить двух-параметрической минимизацией χ^2 значения пересечения координат ствола ШАА (x_0, y_0) с плоскостью наблюдения, при этом параметр возраста ШАА (s) определяется аналитически (выражение 3), а полное число частиц в ШАА (N_0) рассчитывается методом максимального правдоподобия из выражения (4).

* Метод определения угловых координат стволов ШАА, основанный на принципе минимизации χ^2 с автокалибровкой точностей и смещенностей временных измерений сцинтилляторами, позволяет получить несмещенные и эффективные оценки зенитного ($\sigma(\theta) \leq 3^\circ$) и азимутального ($\sigma(\varphi) \leq 0.05, 0.08, 0.13$ для $\theta = 30^\circ, 20^\circ, 10^\circ$) углов ШАА при числе частиц в ливне $N \geq 10^4$.

* Разработанный метод дифференциальной обработки информации с рентген-эмульсионных экспериментов (выражения 5, 6) улучшил (на $\approx 30\%$) точность абсолютной калибровки методики РЭК по распадам $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$. Метод позволяет проводить структурный анализ пятен потемнений на рентгеновских пленках, вызванных семействами высокоэнергичных γ -квантов.

* В задачах восстановления параметра функции распределения усовершенствованный метод оптимальной группировки экспериментальных данных позволяет получать как границы интервалов группировки, так и оптимальное число интервалов при заданном значении объема выборки.

По энергетическому спектру адронов

* Абсолютный дифференциальный энергетический спектр адронов на уровне гор для энергий $1+10 \text{ ТэВ}$ имеет вид

$$\frac{\partial Z}{\partial E} = \begin{cases} (6.54 \pm 0.09) \cdot 10^5 \cdot E^{-2.88 \pm 0.01} & \text{"все" адроны} \\ (3.69 \pm 0.09) \cdot 10^5 \cdot E^{-2.91 \pm 0.02} & \text{"одиночные" адроны} \end{cases}$$

с размерностью $(\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{стер} \cdot \text{ГэВ})^{-1}$. Результаты в пределах ошибок эксперимента согласуются с теоретически ожидаемыми значениями по модели КГС и "нормального" энергетического спектра первичных ядер. Полученные точности показателей спектров более чем в два раза превышают аналогичные мировые данные.

* Абсолютный интегральный энергетический спектр адронных

группы в зависимости от числа адронов в группах $n > 1$ аппроксимирован выражением (8) представляющим собой непрерывное продолжение интегрального энергетического спектра одиночных адронов. Значения параметров α_{en} и γ_{en} рассчитаны методом минимизации χ^2 и оказались равны $\alpha_{en}(n=1)=0.54 \pm 0.03$, $\alpha_{en}(n > 1)=0.78 \pm 0.05$, $\gamma_{en}=1.84 \pm 0.03$. Усредненное значение для всего интервала $n < 10$ равно $\alpha_{en}=0.62 \pm 0.03$. Энергетический спектр адронных групп в зависимости от числа адронов в группе получен впервые.

Соответствующие ожидаемые значения параметров α_{en} и γ_{en} для потока адронных групп, моделированного методом Монте-Карло, равны $\alpha_{en}=0.66 \pm 0.03$, $\gamma_{en}=1.96 \pm 0.02$.

* Спектр адронов по зенитным углам описывается степенной функцией $\mathcal{J}(E, \theta) = \mathcal{J}(E) \cdot \cos^m \theta$, где значение показателя равно $m=6.6 \pm 0.2$ и в пределах ошибок эксперимента не зависит от энергии адронов (E). Точность показателя спектра рассчитана с 95% достоверностью и значительно превосходит точности мировых данных.

* На основе аппроксимаций энергетического спектра "всех" адронов, энергетического спектра первичных нуклонов и решений уравнения диффузии впервые получена зависимость σ_{N-Air}^{in} от энергии адронов E для интервала $1+30$ ТэВ.

$$\sigma_{N-Air}^{in}(E) = (282 \pm 15) \cdot (1 + (3.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-2} \ln(E/0.1 \text{ ТэВ}))^{-1} \text{ mb.}$$

* Абсолютный энергетический спектр адронов на уровне гор с высокой достоверностью указывает на отсутствие излома в энергетическом спектре первичных протонов в интервале энергий $1+200$ ТэВ. Согласие экспериментальных данных по абсолютным спектрам адронов с теоретическими расчетами достигается при "нормальном" химическом составе и энергетическом спектре первичных ядер -

$$d\mathcal{J}/dE = 0.25 \cdot E^{-2.67} (\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{стер} \cdot \text{ТэВ})^{-1}.$$

По пространственному распределению адронов в ШАЛ -

* Функция пространственного распределения адронов с энергиями в интервале $1+10$ ТэВ в ШАЛ с числом частиц в интервале $10^4+5 \cdot 10^6$ описывается выражением.

$$\frac{df}{d\omega} (N_e > N, E_n > E, r) = A \left(\frac{N}{10^5} \right)^\lambda \left(\frac{E}{10^3} \right)^{-\epsilon} \sigma(r, r_0),$$

где:

$$\sigma(r, r_0) = \exp(-r/r_0) / 2\pi r_0^2.$$

$$r_0 = \alpha \left(\frac{N}{10^5} \right)^\beta \left(\frac{E}{10^3} \right)^\delta,$$

$d\omega = 2\pi r dr$, E измеряется в единицах ТэВ.

Значения параметров аппроксимации, полученных из экспериментов "АНИ-83", "Макет-АНИ", и соответствующие значения теоретических оценок параметров согласно моделям КГС, фрагментации ядер в первичных актах и "нормального" состава первичных космических лучей приведены в таблице.

Таблица параметров аппроксимации ФПР адронов

Параметры	Эксперименты		Теорич
	АНИ-83	Макет-АНИ	КГС
A	1.89 ± 0.09	-	2.00 ± 0.05
λ	0.88 ± 0.04	-	0.95 ± 0.02
ϵ	1.37 ± 0.03	1.40 ± 0.04	1.50 ± 0.02
α	0.84 ± 0.02	0.76 ± 0.06	0.69 ± 0.01
δ	-0.43 ± 0.03	-0.45 ± 0.08	-0.54 ± 0.012
β	0.16 ± 0.02	0.00 ± 0.06	-0.086 ± 0.005

При восстановлении функции пространственного распределения адронов в эксперименте наряду с функцией ошибок измерения максимума в распределении электронно-фотонной и адронной компонент ШАЛ необходимо учитывать функцию ошибок измерения координат траектории первичной частицы, коррелирующих с координатами максимумов в распределениях электронно-фотонной и адронной компонент. Игнорирование функцией ошибок измерений приводит к существенному занижению характеристического радиуса (α) и ложной r_0-N_e корреляции.

* С точки зрения статистического теста χ^2 , теоретически рассчитанная функция пространственного распределения адронов в ШАЛ согласно модели КГС, лучше описывается аппроксимациями А.Брайкина и Ж.Кемпа.

* Интегральный энергетический спектр адронов в ШАЛ испытывает излом при энергиях $E \approx 10$ ТэВ и $N > 10^6$.

По характеристикам электронной компоненты ШАЛ.

* Функция пространственного распределения электронов в ШАЛ для интервалов числа частиц $5 \cdot 10^4 + 2 \cdot 10^6$, расстояний $1+60$ м и параметров возраста $0.4(s) < 1.6$ описывается функцией НКГ. Внутри данных интервалов параметров ШАЛ отклонений от пуассоновых флуктуаций не обнаружено.

* Восстановленный спектр ШАЛ по результатам эксперимента "МАКЕТ-АНИ" в интервале изменения параметра возраста $0.2(s) < 1.8$

аппроксимируется степенными функциями

$$Z(N_0 > N) \cong N^{-\gamma}, \quad \text{где } \gamma = \begin{cases} 1.50 \pm 0.01 & \text{для } N_0 \leq N, \\ 1.95 \pm 0.03 & \text{для } N_0 > N, \\ 2.10 \pm 0.07 & \text{для } N_0 > 3N. \end{cases}$$

при значении точки излома спектра $N_0 = (0.8 \pm 0.1) \cdot 10^6$.

Восстановленные интегральные спектры ШАА по числу частиц в зависимости от параметра возраста (s) так же описываются степенными функциями вида $Z(s, N_0 > N) \cong N^{-\gamma(s)}$, причем наклоны

спектров $\gamma(s)$ аппроксимируются выражением

$$\gamma(s) = \begin{cases} (0.15 \pm 0.03) \ln(s) + 1.5 & \text{для } N \leq N_0(s), \\ 2.15 \pm 0.1 & \text{для } N > N_0(s), \end{cases}$$

при соответствующих значениях изломов спектров -

$$N_0(s) = \begin{cases} (5.1 \pm 0.4) \cdot 10^5 & \text{для } s \leq 0.8, \\ (6.3 \pm 0.4) \cdot 10^5 & \text{для } 0.8 < s \leq 1.2, \\ (5.6 \pm 1.0) \cdot 10^6 & \text{для } s > 1.2. \end{cases}$$

Из аппроксимаций видно что наряду с корреляцией наклонов спектров ШАА с параметром возраста (s) наблюдается сильная зависимость места излома спектров от значения возрастов ШАА при больших значениях s .

Данная особенность поведения интегральных спектров ШАА на уровне гор в зависимости от параметра возраста наблюдается впервые и необъяснима изломом в энергетическом спектре первичных космических лучей в области энергий $\sim 10^{15}$ эВ.

* Форма распределения параметра возраста зависит от числа частиц в ШАА и до точки излома спектра молодых ШАА ($N_0 \approx 5 \cdot 10^5$) согласуется с нормальным распределением. При $N_0 \approx 10^6$ и выше, распределение описывается суммой двух гауссоподобных функций с весовыми множителями, зависящими от N_0 . Из характера зависимости параметров этих распределений от N_0 следует, что одна из функций согласуется с ожидаемыми значениями по каскадной теории развития ливней, в то время как вторая функция имеет аномальный характер зависимости от N_0 . После точки излома "старых" ливней ($N > 10^6$) вклад второй функции становится доминирующим.

* Формы теоретических распределений возраста ШАА в области $N < 10^6$, согласно модели КГС, совпадают с экспериментом со сдвигом среднего значения на величину ≈ 0.1 .

* Возрастание значений регистрируемого среднего возраста

ШАА от N_0 в области $(1+4) \cdot 10^6$ объяснимо влиянием аппаратных функций регистрации. Поведение среднего возраста при $N_0 > (0.5+1) \cdot 10^7$ имеет аномальный характер.

* Зависимость дисперсии распределения параметра возраста зарегистрированных ШАА от числа частиц в ливне для $N_0 < 10^6$ близка к ожидаемым значениям согласно КГС модели и "нормального" первичного состава.

* Теоретические расчеты по моделям суперпозиции и фрагментации ядер в ядро-ядерных взаимодействиях показали, что отличие их по энергетическому спектру адронов ТэВ-ных энергий на уровне гор незначительно. Однако, при описании функций пространственного распределения электронной и высокоэнергичной адронной компонент ШАА принцип суперпозиции приблизительно в 1.5+2 раза занижает флуктуации. Согласие с экспериментом достигается только учетом фрагментации ядер в первичных актах неупругих взаимодействий.

* С увеличением зенитного угла падения ШАА, величина среднего возраста растет как

$$s \cong A \cdot \sec(\theta) + s_0, \quad \text{где } A = \begin{cases} 0.11 \pm 0.02 & \text{при } 5 \cdot 10^4 < N \leq 5 \cdot 10^5, \\ 0.23 \pm 0.04 & \text{при } 5 \cdot 10^5 < N \leq 5 \cdot 10^6, \end{cases}$$

а параметр $s_0 = 0.76 \pm 0.01$.

* Поведение спектра по числу частиц адрон-содержащих ШАА на уровне гор при энергиях адронов $E \gg 1$ ТэВ и $N \geq 10^6$, что соответствует первичным энергиям $E > 2 \cdot 10^{15}$ эВ, указывает на противоречие с модельными расчетами, проведенными в предположении излома в энергетическом спектре первичных космических лучей.

* Интенсивность многостовальных ШАА на уровне гор более чем на порядок превышает ожидаемые значения согласно расчетам по КХД теории генерации жестких струй при первичных энергиях $\sim 10^{15}$ эВ. Вероятной причиной этому является завышение в экспериментах оценки $p_1(jet)$, получаемой на основе пространственного расхождения стволов многостовальных ШАА.

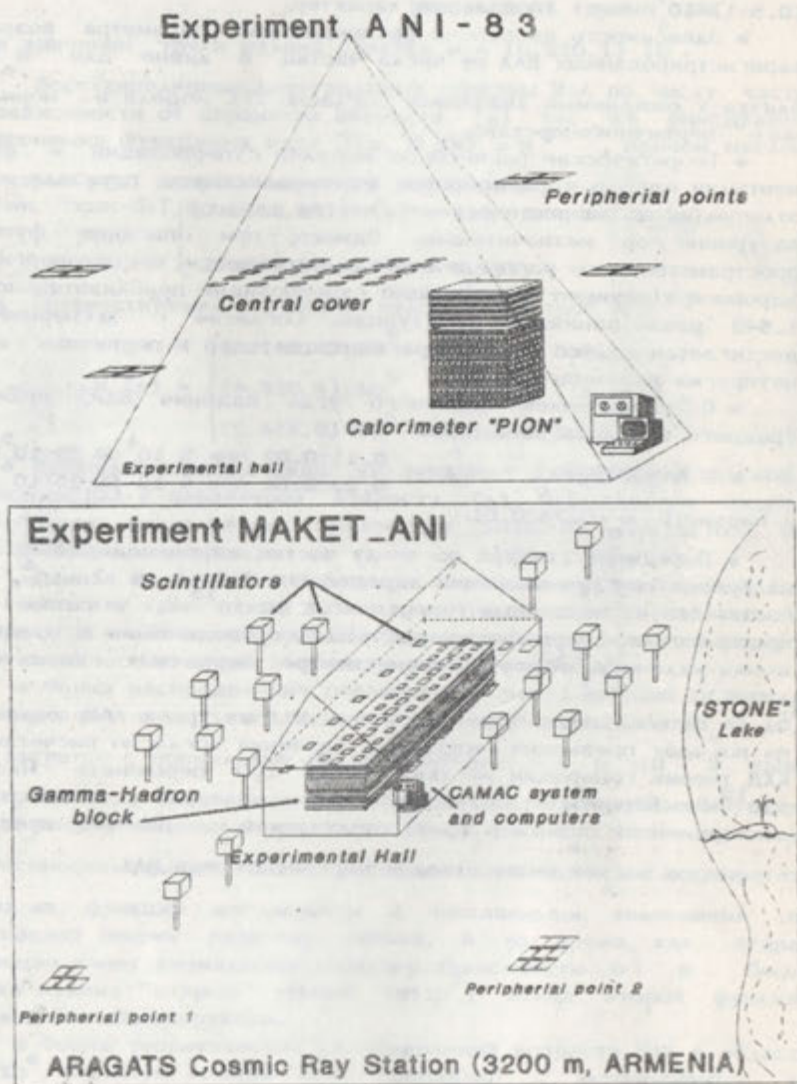


Рис. 1. Эксперимент "АНИ-83".

Рис. 2. Эксперимент "Макет-АНИ".

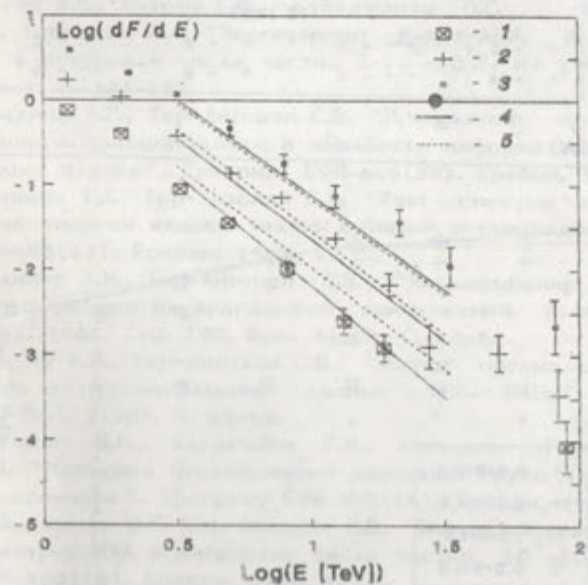
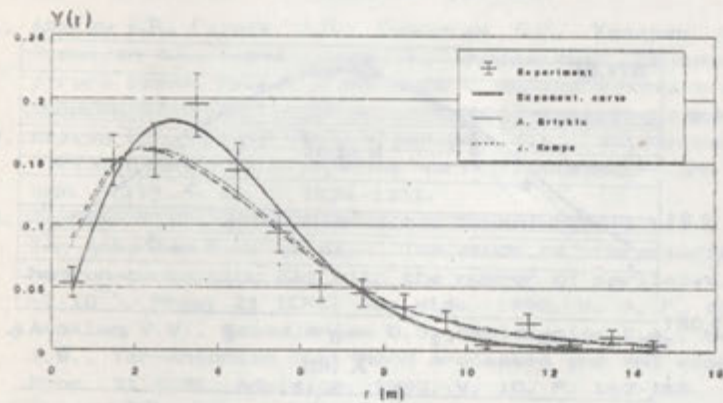


Рис. 3. Функция пространственного распределения адронов в ШАЛ с $N > 10^5$ и $E > 1$ ТэВ ("АНИ-83").

Рис. 4. Дифференциальный энергетический спектр адронов в ШАЛ для $N = 1.7 \cdot 10^5, 5 \cdot 10^5, 1.5 \cdot 10^6$ (точки 1+3).

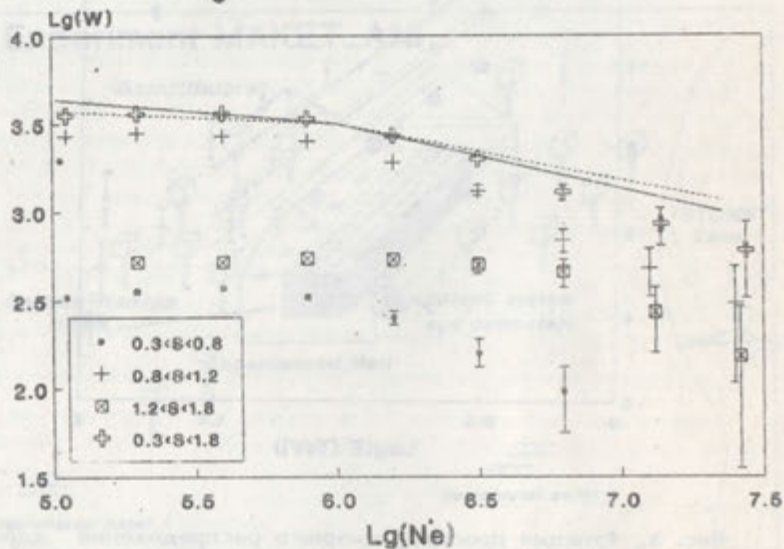
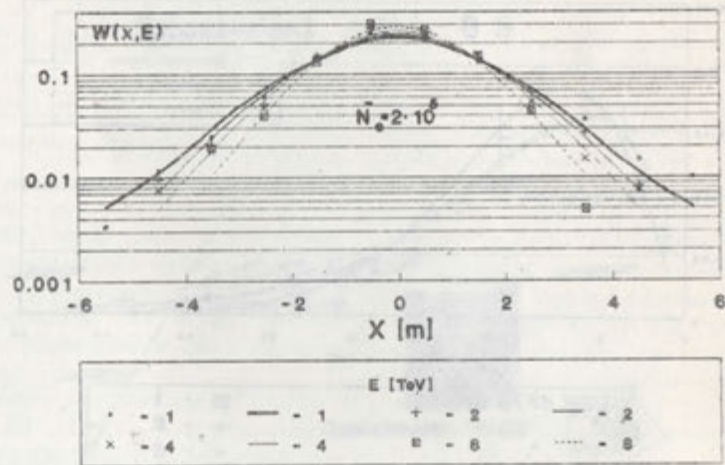


Рис. 5. Функция пространственного распределения адронов в ШАА (x-проекция). Точки - эксперимент "Макет-АНИ", линии - аппроксимации.

Рис. 6. Интегральный спектр ШАА для разных возрастов $\hat{\alpha}$.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Авакян В.В., Гаряка А.П., Геворкян С.Р., Казарян С.С. ... Оганесян А.Г., Тер-Антонян С.В. "Определение сечения неупругого взаимодействия пионов и нуклонов с ядрами железа в интервале энергий 0.5-5 ТэВ". ЯФ. 1984. Т. 40. Вып.4(10) С. 949-959.
2. Авакян В.В., Азарян М.О., Григорян С.А., Тер-Антонян С.В. "Исследование характеристик частиц альбедо...". ЯФ. 1986. Вып. 5(11). Т. 44. С. 1224-1231.
3. Avakian V.V., Arzumani S.A., Babadjanian O.S.... Ter-Antonian S.V. et al. "The study of characteristics of hadron-containing EAS with the number of particles $10^{-5} - 10^6$ ". Proc. 21 ICRC: Adelaide. 1990. V. 9, P. 60-63.
4. Avakian V.V., Babadjanian O.S. Mamidjanian E.A., Matinian S.G., Ter-Antonian S.V. "Hard processes and ANI experiment". Proc. 21 ICRC. Adelaide. 1990. V. 10. P. 162-165.
5. Авакян В.В., Авакян К.Ш., Бабаджанян О.С.... Тер-Антонян С.В., Товмасын А.А. "Эксперимент Макет-АНИ. Исследование ШАА в интервале числа частиц $5 \cdot 10^4 - 10^7$ ". ЯФ 1993. Т. 56. Вып. 9. С. 174-182.
6. Мелкумян А.Г., Тер-Антонян С.В. "Применение метода максимального правдоподобия в обработке информации с рентгено-эмульс. пленок". Препринт ЕФИ-649(39). Ереван. 1983. 20 с.
7. Асатиани Т.А., Тер-Антонян С.В. "Учет спектра при определении энергии мюонов многослойными установками". Препринт ЕФИ-653(43), Ереван, 1983. 12 с.
8. Козлинер А.И., Тер-Антонян С.В. "Исследование электромагнитных ливней на Арагацской комплексной установке". Сб. ВАНИТ. 1984. Сер. ТФЭ. Вып. 3(20). С. 48-54.
9. Погосян А.К., Тер-Антонян С.В. "Метод оптимальной группировки экспериментальных данных". Сб. ВАНИТ. 1984. Сер. ТФЭ. Вып. 3(20). С. 65-68.
10. Авакян В.В., Карагезян Г.В., Овсепян Г.Г., Тер-Антонян С.В. "Методика исследования адронных групп в ионизационном калориметре". Препринт ЕФИ-995(45), Ереван, 1987. 28 с.
11. Бабаджанян О.С. Тер-Антонян С.В. "Метод восстановления параметров ШАА в интервале числа частиц $10^3 - 10^6$ ". Препринт ЕФИ-1031(8), Ереван. 1989. 14 с.
12. Ter-Antonian S.V. "A combined method for determination of EAS parameter". Preprint YERPHI-1168(45), Yerevan. 1989.
13. Avakian V.V., Babadjanian O.S. Lulukien I.A., Mejlumian D.A. Sevinian E.A., Tovmassian A.L., Ter-Antonian S.V. "A method for determination of the angular coordinates of EAS cores". Preprint YERPHI-1168(45), Yerevan. 1989. 18 p.
14. Melkumian L.G., Ter-Antonian S.V. "A new method of data processing from X-ray emulsion films in investigation of

- nuclear interact." Preprint EPI-725(40), Yerevan 1984, 8p.
15. Мелкумян А.Г., Тер-Антонян С.В. "Новый метод структурного анализа гамма-семейств". Сб. ВАНИТ. 1984. Сер. ТФЭ. Вып. 3(20). С. 60-64.
 16. Melkumian L.G., Ter-Antonian S.V., Smorodin Yu.A. "A new method of differentiation structural analysis of γ -family basic parameters". Proc. 19 ICRC. La Jolla. 1985. V. 6. P. 396-399.
 17. Бородкин В.А., Генина Л.Э., Мелкумян А.Г., Смородин Ю.А., Тер-Антонян С.В. "Флуктуации плотности на денситометрических растрах электронно-фотонных каскадов...". Препринт ФИАН СССР. №249, Москва, 1988.
 18. Мамиджанян Э.А., Мелкумян А.Г., Смородин Ю.А., Тер-Антонян С.В. "Калибровка энергии, измеряемой в рентгено-эмульсионных экспериментах". ЯФ. 1990. Т. 52. Вып. 4(10). С. 1033-1039.
 19. Mamidjanian E.A., Melkumian L.G., Smorodin Yu.A., Ter-Antonian S.V. "Application of maximum likelihood analysis to scanning microdensitometer data from X-ray emulsion chambers". Nucl. Instr. & Methods. 1993. В. 883. P. 419-424.
 20. Авакян В.В., Мамиджанян Э.А., Овсепян Г.Г., Тер-Антонян С.В. "О методах определения параметров энергетических спектров адронов...". Сб. ВАНИТ. 1985. Сер. ТФЭ. Вып. 4/25/. С. 85-89.
 21. Avakian V.V., Mamidjanian E.A., Ovsepyan G.G., Pleshko M.P., Ter-Antonian S.V. "The absolute spectrum of 1 TeV hadrons 700 g/cm² deep in the atmosphere". Preprint EPI-952(2). Yerevan. 1987. 8 p.
 22. Авакян В.В., Мамиджанян Э.А., Овсепян Г.Г., Тер-Антонян С.В. "Абсолютный энергетический спектр и зенитно-угловое распределение адронов при энергиях выше 1 ТэВ". Изв. АН СССР. 1989. Сер. физ. Т. 53. №2. С. 227-229.
 23. Авакян В.В., Мамиджанян Э.А., Овсепян Г.Г., Тер-Антонян С.В. "Дифференциальный энергетический спектр и угловое распределение адронов на высотах гор при энергиях $E \geq 1$ ТэВ". ЯФ. 1989. Т. 50. Вып.1(7). С. 134-141.
 24. Avakian V.V., Movssepian G.G., Mamidjanian E.A., Ter-Antonian S.V. "The absolute spectrum, angular distribution and composition of hadron fluxes at high altitudes at energ. $E \geq 1$ TeV". Proc. 21 ICRC. 1990 Adelaide 8, P. 206-209.
 25. Авакян В.В., Мамиджанян Э.А., Овсепян Г.Г., Тер-Антонян С.В. "Потоки пионов и протонов на высотах гор при ТэВ-ных энергиях". ЯФ. 1990. Т. 51. Вып. 3. С. 770-773.
 26. Avakian V.V., Mamidjanian E.A., Movssepian G.G., Ter-Antonian S.V. "The flux of hadron bundles of the mountain altitudes". Proc. 22 ICRC. 1991. Dublin. V.4. P. 299-302.
 27. Авакян В.В., Мамиджанян Э.А., Овсепян Г.Г., Тер-Антонян С.В. "Поток высокоэнергичных адронных групп на уровне гор". ЯФ. 1992. Т. 55. Вып. 3. С. 746-752.
 28. Авакян В.В., Гаряка А.П., Геворкян С.Р., Тер-Антонян С.В. и др. "Определение σ_{p-Air}^{prod} в эксперименте АНИ для интервала энергий протонов 10^4-10^5 ТэВ". Сб. ВАНИТ. 1986. Сер. ТФЭ. Вып. 3(29). С. 57-71.
 29. Авакян В.В., Мамиджанян Э.А., Овсепян Г.Г., Тер-Антонян С.В. "Пространственное распределение высокоэнергичных адронов в ШАА с числом частиц 10^4-10^6 ". ЯФ. 1991. Т. 54. Вып. 6(12). С. 1654-1662.
 30. Avakian V.V., Mamidjanian E.A., Movssepian G.G., Ter-Antonian S.V. "The lateral distribution of EAS hadrons in energy range of 0.5-5 TeV". Proc. 22 ICRC. 1991. Dublin. V. 4. P. 303-306.
 31. Тер-Антонян С.В., Авакян К.М. и др. "Энергетический спектр и функция пространственного распределения адронов в ШАА на уровне гор. Эксперимент Макет-АНИ". Изв. РАН. 1994. Сер. физ. Т. 58. №9. С. 75-78.
 32. Авакян В.В., Мамиджанян Э.А., Овсепян Г.Г., Тер-Антонян С.В., Тухиш Е.И. "Интегральный спектр ШАА на уровне гор в интервале числа частиц $5 \cdot 10^4-5 \cdot 10^7$ ". ЯФ. 1993. Т. 56. Вып. 9. С. 183-190.
 33. Авакян В.В., Мамиджанян Э.А., Бабаджанян О.С., Матинян С.Г., Тер-Антонян С.В. "Исследование процессов рождения струй с большими поперечными импульсами". Изв. АН СССР. 1991. Сер. физ. Т. 55. №4. С. 669-670.
 34. Danilova T.V., Danilova E.A., Erykin A.D., Ter-Antonian S.V. "The ANI experiment...". Nucl. Instr. & Meth. 1992. A(323). P. 104-107.
 35. Avakian V.V., Avakian K.M., Ter-Antonian S.V., Tovmassian A.L. "Status report on "Maket-ANI" experiment". Proc. 24-th ICRC, Roma, V. 1. P. 348-351.
 36. Ter-Antonian S.V., Mamidjanian E.A. et al. "Integral EAS spectrum at mountain altitude in the "knee" region". Proc. 24-th ICRC, Roma, V. 1. P. 365-368.
 37. Ter-Antonian S.V., Mamidjanian E.A. et al. "Energy spectrum and hadron lateral distribution in EAS at mountain altitude. Maket-ANI experiment". Proc. 24-th ICRC, Roma, V. 1. P. 369-372.

ՏԵՐ-ԱՆՏՈՆՅԱՆ ՍԱՄՎԵԼ ՎԼԱԴԻՄԻՐԻ

ՏԻԵՋԵՐԱԿԱՆ ՀԱՌԱԳԱՅՈՒՆԵՐԻ ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅԻՆ և ԲԱՐՉՐ
ԷՆԵՐԳԻԱԿԱՆ ՀԱԴՐՈՆԱՅԻՆ ԲՈՂԱԴՐԻՉՆԵՐԻ ՏԱՐԱԾՍՎ-ԷՆԵՐԳԻԱԿԱՆ
ԲԱՆԵՈՒՄՆԵՐԸ ԼԵՈՆԱՅԻՆ ԲԱՐՉՐՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ 10^{14} \div 10^{16} ԷՎ
ՍԿՋԵԼԱԿԱՆ ԷՆԵՐԳԻԱՆԵՐԻ ԴԵՊՋՈՒՄ

Ատենախոսության մեջ առաջված են «Պիոն» կայարանների վրա հաղ-
րոսների և հաղրոնային խմբերի էներգիական բացարձակ բաշխումների
բացահայտ գերձշգրիտ չափումների արդյունքները $1 \div 10$ ՏԷՎ էներգիաների
դեպքում:

«ԱՆԻ-83» տեղակայանքի փորձարարական տվյալների հիման վրա
ստացված են հաղրոսների տարածային բախշման ֆունկցիաները մթնոլորտա-
յին լայնատարած հեղեղներում (ՄԼՀ) $E > 0.5$ ՏԷՎ հաղրոսների էներգիա-
ների դեպքում և ՄԼՀ-ում $10^4 \div 10^5$ մասնիկների թվի դեպքում:

«ՍԱԿԵՏ-ԱՆԻ» տեղակայանքի վրա կատարվել են ա) $10^5 \div 10^7$ մաս-
նիկների թվի դեպքում ՄԼՀ-ի էլեկտրոնային բաղադրիչի բնութագրիչների
չափումները, բ) $1 \div 100$ ՏԷՎ հաղրոսների էներգիաների դեպքում ՄԼՀ-ի
կազմում հաղրոսների էներգիական բաշխման և տարածային բաշխման
ֆունկցիաների չափումները:

Գիտափորձի արդյունքները համեմատվել են տեսական հաշվարկների
հետ, որոնք սկզբնական տիեզերական ճառագայթման էներգիական բաշխվա-
ծության վարքի և միջուկային բաղկացության մասին տարբեր հիպոթեզների
համար առավելագույնս մոտեցված են բվարկ-գլյուանային շիթերի
մոդելին:

Ատենախոսությունը բաղկացած է 199 էջից և իր մեջ ներառում է
ներածություն, 6 գլուխ, եզրակացություն և զրականության ցանկ:

Ատենախոսության արդյունքները հրատարակվել են 37 գիտական աշխա-
տանքում:

TER-ANTONIAN SAMVEL V.

LATERAL AND ENERGY DISTRIBUTIONS OF ELECTRON AND HIGH
ENERGY HADRON COMPONENTS OF COSMIC RAYS AT MOUNTAIN
LEVEL FOR PRIMARY ENERGIES 10^{14} \div 10^{16} EV

The results of long standing investigations of high energy
hadron flux and Extensive Air Showers at the Aragats Cosmic
Ray Station (ARMENIA, 700 g/cm²) are presented.

15.05.2014

Технический редактор Абрамян А.С.

Подписано в печать 30.11.95.
Офсетная печать.
Заказ тип. № 186

Формат 60x84/16
Тираж 80 экз.

Отпечатано в Ереванском физическом институте
Ереван 36, ул Братьев Алиханян, 2

