

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ  
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМИНИ

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М. В. ЛОМОНОСОВА

Научно-исследовательский институт ядерной физики

На правах рукописи  
УДК 523.165

ДЕЖУРКО Михаил Дмитриевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПЕРВИЧНОГО КОСМИЧЕСКОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ  $\geq 1$  ТЭВ/НУКЛОН МЕТОДОМ  
РЕНТГЕНЭМУЛЬСИОННЫХ КАМЕР

01.04.16: физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена на кафедре космических лучей и физики космоса физического факультета Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова.

Научные руководители - доктор физико-математических наук,  
профессор И.В.РАКОВОЛЬСКАЯ,  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник В.И.ЗАЦЕПИН

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Г.Б.ЖДАНОВ /Физический институт  
им. П.Н.Лебедева АН СССР/  
кандидат физико-математических наук  
В.Я.ШЕСТОПЕРОВ /НИИЯЭ МГУ/.

Ведущая организация - Институт ядерных исследований АН СССР.

Защита диссертации состоится "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1983 г.  
в \_\_\_\_ часов на заседании Специализированного Совета  
К-053,05.24 в Московском государственном университете  
им. М.В.Ломоносова по адресу:  
И17234, г.Москва, Ленинские Горы, НИИЯЭ МГУ, 19 корпус,  
ауд. 2-15.  
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯЭ МГУ.

Автореферат разослан "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1983 г.

Ученый секретарь Специализированного Совета  
кандидат физико-математических наук



Ю. А. Фомин

2017

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Изучение вида энергетического спектра первичных частиц космических лучей и особенно химического состава в области высоких энергий имеет первостепенное значение для двух основных аспектов физики космических лучей: астрофизического и ядерно-физического. В первом случае спектр и химический состав - это те основные характеристики, которые непосредственно связаны с механизмом ускорения частиц и их распространением в галактическом пространстве. Во втором случае спектр и химический состав - характеристики, которые существенно входят в различные модели, интерпретирующие процессы взаимодействия частиц ультравысоких энергий с веществом атмосферы.

Используемые в настоящее время установки позволяют измерять химический состав космических лучей до энергий в сотни Гэв/нуклон. Установлено, что при энергиях более 5 Гэв/нуклон химсостав частично изменяется с ростом энергии. Уменьшается доля так называемых вторичных ядер космических лучей, имеются указания на возрастание доли ядер железа. Измерение химсостава при энергиях более 1 Тэв/нуклон еще практически не проводилось.

Трудности проведения измерений химсостава при все более высоких энергиях связаны с сильным уменьшением потоков ядер с ростом энергии, а также с проблемой определения энергии таких ядер. Возможности установок, использующих магнитные спектрометры и черенковские детекторы для определения энергии, практически ограничиваются энергиями 100 Гэв/нуклон. Наибольшего продвижения в область высоких энергий (до 1 Тэв/нуклон) в настоящее время удалось достичь с помощью установки калориметрического типа (Simon M. et al., 1979, 16 ICRC, v.1, p. 352), однако статистическая точность этих данных при наибольших энергиях невелика.

Таким образом, получение сведений о химсоставе космических лучей при энергиях более 1 Тэв/нуклон является актуальной задачей физики космических лучей.

Цель работы заключалась в разработке новой методики определения химсостава космических лучей при энергиях более  $1 \text{ Тэв/нуклон}$  с помощью рентгенэмульсионных камер, а также в получении с помощью этой методики данных о химсоставе в этой области энергий.

В работе решались следующие задачи:

1. Создание установки для измерения химсостава космических лучей на основе рентгенэмульсионной камеры.
2. Разработка способа поиска ядер космических лучей высокой энергии, зарегистрированных в камере.
3. Определение зарядов найденных ядер.
4. Определение энергетического порога регистрации ядер в камере.
5. Получение сведений о химсоставе космических лучей при энергиях  $\sim 1 \text{ Тэв/нуклон}$ .

Научная новизна.

1. Разработан новый метод определения химсостава космических лучей, позволяющий проводить измерения при энергиях  $\geq 1 \text{ Тэв/нуклон}$ .
2. Получены данные о химсоставе в этой практически неисследованной области энергий.

Научная и практическая ценность работы. Показана возможность успешного применения методики рентгенэмульсионных камер для изучения химического состава космических лучей в области энергий  $\geq 1 \text{ Тэв/нуклон}$ . Полученные сведения о химсоставе в этой области энергий существенны для понимания происхождения первичного космического излучения и процессов его взаимодействия в атмосфере. Эти сведения могут быть использованы при анализе экспериментальных данных по космическому излучению высокой энергии и при планировании новых экспериментов.

Апробация работы. Основные материалы диссертации докладывались и обсуждались на трех международных конференциях по космическим лучам /Пловдив-77, Киото-79, Париж-81/, на семинаре Физического института АН СССР /Москва, 1981/ и опублико-

ваны в пяти работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения; изложена на 130 страницах, иллюстрирована 25 рисунками, содержит 16 таблиц и список литературы из 70 наименований.

Автор защищает:

1. Метод изучения химического состава космических лучей в области энергий  $\geq 1$  Тэв/нуклон.

2. Экспериментальные данные, полученные в результате экспонирования двух камер.

3. Проведенный анализ экспериментальных данных.

4. Выводы о ядерном составе первичного космического излучения при энергиях  $\sim 1$  Тэв/нуклон, полученные в результате анализа экспериментальных данных.

### СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении описана сложившаяся к настоящему времени ситуация по измерению химического состава первичного космического излучения /ПКИ/ в области высоких энергий, изложена основная идея и выгоды применения методики рентгеномульсионных камер для подобных измерений. Идея разработанного метода была предложена В.И.Зацепиным.

В первой главе описаны конструкция созданных камер и условия их экспонирования. Рентгеномульсионные камеры, с помощью которых проводились измерения, состояли из 24 листов свинца размерами  $92 \times 48$  см<sup>2</sup>, переслоенных пакетами с регистрирующими пленками. 10 верхних слоев свинца имели толщину 1 мм и находились между пакетами с ядерной эмульсией. Под остальными 14 слоями 5 мм свинца были пакеты с рентгеновской пленкой и ядерной эмульсией. Листы свинца вместе с пакетами помещались в металлический контейнер. Чтобы после проявления иметь координатную привязку пленок, на упакованные в камере листы ядерной эмульсии и рентгеновской пленки наносилась система

особых меток с помощью источника рентгеновского излучения.

Камеры экспонировались на аэростатах на высоте  $\sim 30$  км. Во время полета слои камеры находились в горизонтальном положении. Суммарное время экспозиции двух камер составило 82.6 часа на средней глубине в атмосфере  $9.2 \text{ г/см}^2$ .

Принцип регистрации ядер высокой энергии заключается в следующем. Частицы ПКИ высокой энергии взаимодействуют в камере с ядрами свинцового поглотителя и дают начало электронно-фотонным каскадам, которые развиваются в свинцовом поглотителе. Каскады регистрируются в слоях рентгеновской пленки и после проявления обнаруживаются невооруженным глазом в виде пятен потемнения. По плотности потемнения пятен определяется энергия данного каскада согласно известной методике рентгеноэмульсионных камер. Эта энергия служит характеристикой энергии первичной частицы, провзаимодействовавшей в камере. По координатам пятен потемнения восстанавливается траектория этой частицы в камере. Треки первичных ядер отыскиваются в соответствующих местах ядерной эмульсии при помощи микроскопа. Заряды найденных ядер определяются путем микрофотометрирования их треков в ядерной эмульсии.

Вторая глава посвящена поиску ядер высокой энергии, зарегистрированных в камере. После проявления рентгеновских пленок в них визуально отыскивались электронно-фотонные каскады, видимые как пятна потемнения. Для дальнейшей обработки отбирались каскады, которые образовали пятна потемнения не менее чем в трех пакетах рентгеновских пленок. Таких каскадов оказалось 839 в обоих камерах.

Последующие координатные измерения проводились в ядерной эмульсии. Рентгеновская пленка служила для указания положения каскадов при их поиске в ядерной эмульсии. Листы ядерной эмульсии разрезались на небольшие пластинки размерами  $120 \times 115 \text{ мм}^2$ , при чем линии разреза в дальнейшем служили осями координат при измерениях положения пятен потемнения. Третьей пространственной координатой служили расстояния меж-

ду слоями пленок, которые определялись по нанесенным особым способом рентгеновским меткам. Координатные измерения осуществлялись на смотровом столике микроскопа с помощью нониусных шкал.

Таким образом, в каждом слое эмульсии имелась своя система координат, причем эти системы координат совпадали между собой с точностью  $\sim 1$  мм, определяемой погрешностью привязки к координатным меткам. Более точное соответствие между этими системами координат устанавливалось после привязки к "опорным" событиям - каскадам или многозарядным ядрам, видимым в максимально возможном числе слоев. После осуществления такой коррекции относительное расположение различных систем координат в слоях эмульсии было известно с точностью  $\pm 50$  мкм.

Следующий этап обработки заключался в определении зенитных  $\psi$  и азимутальных  $\varphi$  углов каскадов в камере. Координаты пятен потемнения данного каскада пересчитывались к единой системе отсчета, связанной с самым верхним слоем эмульсии. Методом наименьших квадратов находилось уравнение прямой линии, наилучшим образом описывающей совокупность этих координат. Зенитный и азимутальный углы такой линии приписывались соответствующим углам данного каскада. Погрешность определения углов  $\psi$  и  $\varphi$  в среднем составляла  $0,2^\circ$ .

Координаты осей прослеживаемых каскадов рассчитывались во всех слоях ядерной эмульсии. Контроль за точностью такого расчета показал, что истинное положение оси каскада имеет среднеквадратичное отклонение от расчетных точек в пределах 110-140 мкм. По расчетным точкам каскады прослеживались до начала своего развития, после чего начинался поиск первичных частиц, образовавших эти каскады.

Поиск первичных частиц осуществлялся при 135-кратном увеличении в круге радиуса 500 мкм вокруг расчетных точек положения оси каскада. Искались первичные частицы с плотностью потемнения трека, соответствующей релятивистским ядрам с  $Z \geq 3$ . В расчетном круге поиска присутствовало  $\sim 40$  фоно-

ных частиц с такой плотностью потемнения. Из них на долю ядер ПКИ с энергией выше геомагнитного порога обрезания приходилось около 2 частиц, а остальные представляли собой "черные" следы вторичных частиц малой энергии.

Чтобы выделить первичную частицу из числа фоновых частиц, попавших в круг поиска, использовались следующие критерии. Во-первых, требовалось, чтобы в пределах погрешности измерений углы  $\psi$  и  $\varphi$  частицы совпадали с соответствующими углами оси каскада. Каждая фоновая частица может случайно удовлетворять этому критерию с вероятностью 0.003. Во-вторых, требовалось, чтобы частица прослеживалась во всех вышележащих слоях ядерной эмульсии. Это требование позволяет практически полностью отсеять фоновые "черные" частицы, поскольку они поглощаются уже в одном слое свинца, а одновременное случайное нахождение таких частиц в 5-10 слоях эмульсии имеет пренебрежимо малую вероятность. В-третьих, требовалось, чтобы прослеживаемая частица не была видна по соседству с ливнем в тех слоях, где впервые появился каскад. Конечно, фрагмент первичного ядра может находиться в стволе самого ливня. Это требование позволяет снизить вероятность случайного совпадения для фоновых ядер ПКИ еще на 1-2 порядка. В итоге случайная фоновая частица могла быть принята за первичную не чаще, чем один раз на несколько тысяч просмотренных каскадов.

Окончательно вывод о том, что найдена действительно первичная частица, делался после анализа по всем перечисленным выше критериям и после сравнения траектории найденной частицы с расчетной осью прослеживаемого каскада.

Поиск первичных частиц проводился для каскадов, попавших в заданный геометрический фактор камеры и имеющих зенитные углы в пределах  $25^\circ \leq \psi \leq 60^\circ$ .

После прослеживания 497 каскадов, удовлетворявших этим требованиям, было установлено, что из них 43 каскада образованы ядрами ПКИ высокой энергии с зарядами  $Z \geq 3$ .

В третьей главе описан метод измерения зарядов найден-

ных ядер ПКИ. Заряды ядер определялись фотометрическим способом. В качестве характеристики заряда использовалась оптическая плотность потемнения эмульсии в пределах прямоугольной диафрагмы фотометра. Измерения проводились при 125-кратном увеличении с помощью сканирующего микрофотометра ИФ0-451. Измерительная щель фотометра соответствовала в плоскости ядерной эмульсии размерам  $32 \times 1.6 \text{ мкм}^2$ . Изображение трека ядра устанавливалось параллельно щели и с помощью микрометрической подачи перемещалось в плоскости измерительной диафрагмы поперек щели. При перемещении трека оптическая плотность потемнения эмульсии регистрировалась самописцем. У прописанного профиля трека измерялась амплитуда  $A$ , которая отсчитывалась относительно среднего уровня фона эмульсии на расстояниях, существенно превышающих ширину трека. Контроль над стабильностью работы фотометра осуществлялся прописыванием одного и того же "стандартного" трека. Амплитуды, измеренные в один день, делились на нормировочный коэффициент, пропорциональный амплитуде "стандартного" трека, полученной в этот же день.

Для каждого трека получали серию профилей, прописывая его 6-8 раз подряд. Для длинных треков такая серия повторялась несколько раз по различным участкам его длины. В каждой прописанной серии выбиралось по 4 профиля с наибольшими значениями амплитуд  $A_i$ . За амплитуду данного трека принималось среднее значение  $\bar{A}$  отобранных амплитуд  $A_i$  во всех полученных для этого трека сериях профилей. Каждое ядро фотометрировалось во всех слоях, где оно было обнаружено в ядерной эмульсии. По полученным значениям амплитуд  $\bar{A}$  одного ядра находилось среднее значение  $\langle \bar{A} \rangle$ , которое зависело от заряда и угла падения данного ядра на плоскость эмульсии.

Зависимость амплитуды трека от заряда  $Z$  ядра и его угла падения  $\psi$  аппроксимировалась выражением

$$\bar{A} = k \cdot (Z^2 / \sin \psi)^\alpha$$

где значения параметров  $k$  и  $\alpha$  определялись из калибровочных измерений. Калибровка осуществлялась по релятивистским ядрам углерода и кислорода, которыми на ускорителе облучались пластинки ядерной эмульсии под различными углами.

Угловая зависимость исключалась приведением значений  $\langle A \rangle$  к фиксированному углу  $\psi_0 = 90^\circ$  по формуле

$$A_z = \langle A \rangle \cdot (\sin \psi)^\alpha$$

Величина  $A_z$  характеризовала заряд данного ядра. Исходя из полученных значений  $A_z$  найденные ядра были распределены по основным группам ядер космических лучей следующим образом:

группа L	$Z = 3 - 5$	2 ядра
группа M	$Z = 6 - 9$	23 ядра
группа H	$Z = 10 - 19$	14 ядер
группа VH	$Z \geq 20$	4 ядра

Анализ точности определения зарядов ядер показал, что для различных групп ядер среднеквадратичные погрешности найденных зарядов составляют:

$$\sigma(Z)_M = 0.7 \quad \sigma(Z)_H = 1.2 \quad \sigma(Z)_{VH} = 2.0$$

Такая точность определения зарядов позволила заключить, что произведенное разделение ядер на группы существенно не отличается от истинной картины такого распределения.

В четвертой главе определяются энергетические пороги регистрации частиц в камере. Об энергии  $E$  первичной частицы, образовавшей каскад в камере, можно судить по энерговыделению  $\Sigma E_\gamma$  в мягкую компоненту после взаимодействия этой частицы с ядром свинцового поглотителя. Величина  $\Sigma E_\gamma$  определялась по плотности потемнения пятен, образованных данным каскадом в рентгеновских пленках. При  $\Sigma E_\gamma > 1$  Тэв величина потемнения  $D_m$  в максимуме развития каскада от ядра ПКИ с малым  $Z$  слабо зависит от энергетического спектра и углового распределения образовавшегося пучка  $\gamma$ -квантов и примерно соответствует  $D_m$  в каскаде от электрон-позитронной пары с

энергией, равной суммарной энергии пучка  $\gamma$ -квантов ("электронно-фотонные каскады в космических лучах при сверхвысоких энергиях", М: Наука, 1980). Поэтому для определения  $\Sigma E_{\gamma}$  по  $D_m$  использовалась методика, основанная на расчетных каскадных кривых от электрон-позитронных пар, описание которой можно найти в диссертации Н.В.Сокольской (НИИЯФ ИГУ, 1981).

Величина пороговой энергии регистрации каскадов в камере определяется минимальным потемнением пятен, которое может заметить глаз при визуальном просмотре рентгеновских пленок. Из анализа распределения каскадов в камере по  $\Sigma E_{\gamma}$  было установлено, что эффективная пороговая энергия обнаружения каскадов от легких ядер составляет  $\Sigma E_{\gamma \text{ пор}} = 1.0$  Тэв. Для значения парциального коэффициента неупругости взаимодействия протонов с ядрами свинца  $\langle K_p \rangle = 0.17$  была определена соответствующая пороговая энергия протонов  $E_{p \text{ пор}} = \Sigma E_{\gamma \text{ пор}} / \langle K_p \rangle = 6.0$  Тэв.

Пороговые энергии для остальных групп ядер ПКИ определялись из сравнения расчетных средних каскадных кривых от этих групп ядер с соответствующими кривыми от протонов. Каскадные кривые рассчитывались в виде зависимости числа электронов в круге радиуса 200 мкм от глубины развития каскада. Расчет проводился в осевом приближении каскадной теории. Параметры пучков  $\gamma$ -квантов, дающих начало развитию каскадов, определялись из расчетов взаимодействия ядер ПКИ с ядрами свинцовой мишени. Были использованы расчеты Л.А.Хейна по взаимодействию ядер. В этих расчетах взаимодействие ядро-ядро рассматривалось как суперпозиция нуклон-ядерных взаимодействий и предполагалось сохранение скейлинга для спектра  $\pi^0$ -мезонов при отдельных нуклон-ядерных взаимодействиях.

Для того, чтобы не менее трех точек каскада были обнаружены при просмотре пленок, необходимо, чтобы у этого каскада определенный участок каскадной кривой в районе максимума превышал некоторую пороговую величину  $N_{\text{пор}}$ . Протяженность надпорогового участка зависит от толщины слоев свинца в камере

и от угла падения первичной частицы. Величина  $N_{\text{пор}}$  была найдена из каскадной кривой для протонов с пороговым значением энергии. Затем подбирались каскадные кривые для других ядер ПКИ с надпороговым участком заданной длины. Энергии первичных ядер, образующих такие пороговые каскадные кривые, принимались за пороговые значения энергий этих ядер.

Далее учитывалось влияние флуктуаций энерговыделения путем введения поправок в рассчитанные по средним каскадным кривым пороговые энергии. Для этой цели использовалось "среднее по спектру" значение коэффициента неупругости:

$$K_Y^* = \langle K_Y^\beta \rangle^{1/\beta}$$

где  $\beta$  - показатель интегрального энергетического спектра первичных ядер, а величина  $K_Y$  имеет распределение, учитывающее как флуктуации числа взаимодействующих нуклонов налетающего ядра, так и флуктуации энерговыделения при взаимодействиях отдельных нуклонов налетающего ядра. Результаты расчетов для  $\beta = 1.7$  приведены в следующей таблице.

Таблица I.

Группы ядер ПКИ	$\rho$	$\alpha$	L	M	H	VH
A	1	4	10	14	25	52
$K_Y^* / \langle K_Y \rangle$	1.23	1.17	1.17	1.20	1.23	1.28
$E_{\text{пор}}^*$ Тэв/н	4.9	1.83	1.10	0.89	0.64	0.47

В первой строке приведены средние атомные веса для групп ядер ПКИ. Вторую строку составляют отношения "средних по спектру" коэффициентов неупругости к коэффициентам без учета флуктуаций. В последней строке приведены пороговые энергии, полученные с учетом флуктуаций.

В пятой главе анализируются полученные экспериментальные данные. Производится расчет ожидаемого состава событий в камерах при "нормальном" исходном химсоставе ПКИ, который наблюдается при энергиях  $\sim 1$  Гэв/нуклон. Из сравнения экспериментальных данных с расчетным составом делаются выводы о химсоставе ПКИ в изучаемой области энергий.

Для расчета трансформации исходного "нормального" химсостава ПКИ в атмосфере решаются уравнения диффузии для шести групп ядер: протонов,  $\alpha$ -частиц, L, M, H и VH групп. Учитываются процессы фрагментации и поглощения ядер в атмосфере. Угловым распределением вторичных частиц пренебрегается. Для протонной компоненты учитывается вклад лидирующих нуклонов после взаимодействий. Результаты расчетов представляются в виде зависимости интенсивности каждой компоненты ПКИ от толщины пройденного слоя атмосферы.

Геометрический фактор камер для углов падения частиц в пределах  $25^\circ \leq \psi \leq 60^\circ$  составлял  $G = 0.626 \text{ м}^2 \text{ стер}$ . За вероятность регистрации ядра с надпороговой энергией принималась вероятность его взаимодействия в верхней части камеры, где ядро имеет возможность образовать каскад, видимый не менее чем в трех слоях пленок. Эта вероятность зависит от угла падения ядра. Результаты расчетов приведены в таблице.

Таблица 2.

Группы ядер ПКИ	p	$\alpha$	L	M	H	VH
$\langle \omega \rangle$	0.363	0.467	0.558	0.591	0.675	0.748
$\langle p \rangle$	0.922	0.820	1.251	0.678	0.554	0.450
Q	0.333	0.381	0.699	0.398	0.370	0.333

Здесь  $\langle \omega \rangle$  - усредненная по углам падения частиц вероятность их регистрации в камере;  $\langle p \rangle$  - усредненное по углам относительное ослабление первоначального потока частиц в атмо-

сфере на глубине экспонирования;  $Q = \langle \omega \rho \rangle$  - эффективность регистрации частиц, которая связывает число ядер, регистрируемых установкой, с их потоком за пределами атмосферы.

Ожидаемый состав событий в камерах рассчитывался по формуле:

$$V_i = C \cdot \xi_i \cdot Q_i \cdot (E_{i\text{пор}}^*)^{-\beta} \cdot V_i^0$$

где  $V_i^0$  - доля ядер группы  $i$  в "нормальном" химсоставе ПКИ при фиксированной энергии на ядро, множитель  $(E_{i\text{пор}}^*)^{-\beta}$  учитывает различие порогов регистрации для разных групп ядер,

$\xi_i$  - коэффициенты ослабления потоков ядер в крышке камеры,

$C$  - нормировочный множитель. Рассчитанный для  $\beta = 1.7$  и измеренный составы событий в камерах приведены в таблице 3.

Для получения измеренного состава из 497 прослеженных каскадов были исключены каскады от первичных  $\gamma$ -квантов и от взаимодействий в крышке камеры. Число этих "избыточных" каскадов было определено из анализа распределения каскадов по глубине зарождения в камерах и составило  $117 \pm 19$ .

Таблица 3.

Группы ядер ПКИ	$p + \alpha$	L	M	H	VH	$Z \geq 6$
Рассчитанный состав %	87.7	1.89 (0.77)	6.40	2.68	1.33	10.4
Измеренный состав %	88.7 $\pm 1.7$	0.5 $\pm 0.4$	6.1 $\pm 1.3$	3.7 $\pm 1.0$	1.1 $\pm 0.6$	10.5 $\pm 1.8$

Как следует из этой таблицы, доля ядер с  $Z \geq 6$  хорошо согласуется с предположением о "нормальном" химсоставе ПКИ. Распределение ядер по группам M, H и VH также не противоречит "нормальному" химсоставу. Если бы в исходном составе полностью отсутствовали ядра группы L, то ожидаемая доля таких ядер соответствовала бы числу в скобках в таблице 3.

Измеренная доля ядер  $L$  лучше согласуется с этим числом, что свидетельствует в пользу того, что таких ядер меньше, чем в "нормальном" химсоставе. Уменьшение доли ядер  $L$  с ростом энергии также отмечалось рядом других авторов.

Интегральные потоки групп ядер были определены по соотношению:

$$I(E > E_{i \text{ пор}}) = \frac{N_i}{T G Q_i \Gamma_i}$$

где  $N_i$  - число зарегистрированных ядер группы,  $T$  - время экспонирования камер. Значения потоков групп ядер с  $Z \geq 6$  приведены на рис. 1 совместно с данными других авторов.

В заключении формулируются основные выводы диссертации:

1. Разработан новый метод изучения химического состава ПКИ в области энергий  $\approx 1 \text{ ТэВ/нуклон}$ . Метод отличается простотой и надежностью, позволяет использовать установки с большим геометрическим фактором.

2. Разработан метод анализа полученных экспериментальных данных для извлечения информации об интенсивностях и химическом составе ПКИ.

3. В результате анализа были сделаны следующие выводы о ядерном составе ПКИ при энергиях  $\sim 1 \text{ ТэВ/нуклон}$ :

- Соотношение между суммарной долей протонов и  $\alpha$ -частиц и долей ядер с  $Z \geq 6$  не обнаруживает отличий от "нормального" химсостава ПКИ.

- В пределах достигнутой точности измерений не наблюдается отличий от "нормального" химсостава в распределении ядер по группам для  $Z \geq 6$ .

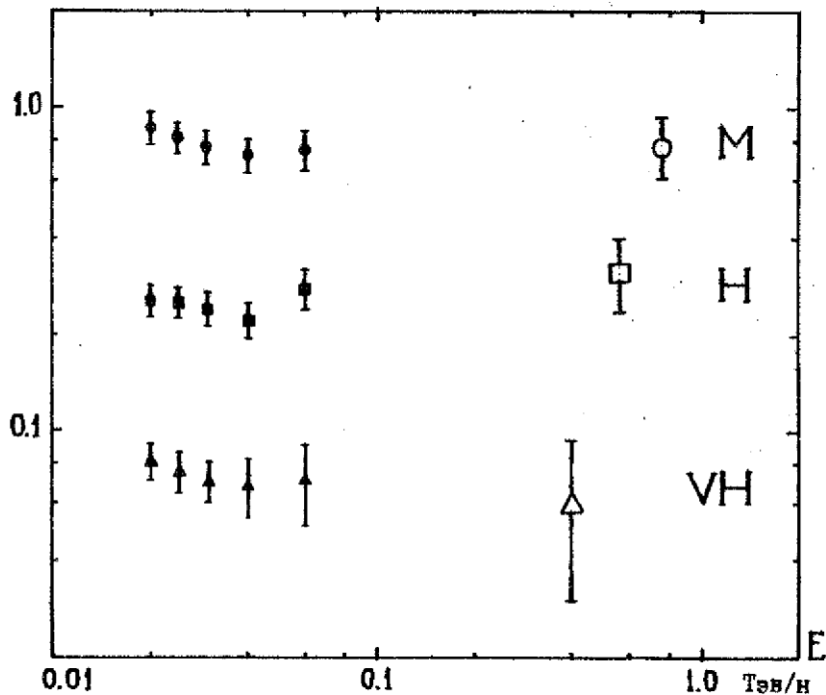
- Наблюдаемое число ядер группы  $L$  согласуется с отмеченным другими авторами уменьшением доли этих ядер с ростом энергии.

В приложении описаны математические методы, применявшиеся для привязки систем координат отдельных слоев ядерной эмульсии к "опорным" событиям и для расчета траекторий первичных частиц в камере.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Dezhurko M.D., Ignatiev S.B., Mandritskaya K.V., Abulova V.G., Rakobolskaya I.V., Sokolskaya N.V., Varkovitskaya A.Ja., Sazhina G.P., Zamchalova E.A., Ivanova M.A., Zatsepin V.I. The method of X-ray emulsion chamber as applied to determination of the chemical composition of primary cosmic rays in the energy range of 10-100 TeV per nucleus. - Plovdiv, 1977 - Proc. 15th Intern. Cosmic Ray Conf.(ICRC), v.11, p.72-75.
2. Abulova V.G., Astafiev V.A., Dezhurko M.D., Hein L.A., Ignatiev S.B., Rakobolskaya I.V., Sazhina G.P., Zamchalova E.A., Zatsepin V. I. Investigation of the chemical composition of primary cosmic rays (PCR) in the energy region  $\geq 1$  TeV/nucleon. - Kyoto, 1979 - Proc. 16th ICRC, v.1, p.358-362.
3. Abulova V.G., Dezhurko M.D., Mandritskaya K.V., Rakobolskaya I.V., Sazhina G.P., Zamchalova E.A., Zatsepin V.I. Measurement of the chemical composition of the primary cosmic rays (PCR) in the energy region  $\geq 1$  TeV/nucleon by the X-ray emulsion technique. - Paris, 1981 - Proc. 17th ICRC, v.2, p.114-117.
4. Dezhurko M.D., Rakobolskaya I.V., Sazhina G.P., Zatsepin V.I. Measurement of relativistic nuclei charges in thin nuclear emulsion by photometric method. - Paris, 1981 - Proc. 17th ICRC, v.9, p.315-318.
5. Dezhurko M.D., Hein L.A., Rakobolskaya I.V., Zatsepin V.I. Calculation of cascade curves for interactions of protons and nuclei of energy  $\geq 1$  TeV/nucleon in lead. - Paris, 1981 - Proc. 17th ICRC, v.9, p.324-327.

$$I(>E) \cdot E^{1.7} \text{ м}^{-2} \text{ час}^{-1} \text{ стер}^{-1} (\text{ТэВ/н})^{1.7}$$



● Caldwell J. 1977, Ap.J., 218, 269

○ данная работа

Рис. I Интегральные потоки ядер групп M, H и VH.

Подписано к печати 26.10.1982 г. Л-90860. Объем I печ.л.  
Формат 60 x 84 I/16. Тираж 100 экз. Заказ 73. Бесплатно.  
Отпечатано на ротапринтере БГУ имени В.И.Ленина.  
г.Минск, Университетский городок, БГУ.

