

На правах рукописи

Куджаев
Александр Уружбекович

Методы исследования
проникающей компоненты ШАЛ
на установке "Ковер-2"
Баксанской нейтринной
Обсерватории
ИЯИ РАН

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

МОСКВА-2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), Москва.

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук
Петков Валерий Борисович

Официальные оппоненты:

Яшин Игорь Иванович, доктор физ.-мат. наук, Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", НОЦ "Невод", ведущий научный сотрудник

Сулаков Владимир Петрович, кандидат физико-математических наук, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), Отдел частиц сверхвысоких энергий, старший научный сотрудник).

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

Защита диссертации состоится «__» _____ 2014г.

в «_____» часов на заседании диссертационного совета Д 002.119.01 ИЯИ РАН по адресу: 117312, г. Москва, проспект 60-летия Октября, д.7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте www.inr.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2014г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ИЯИ РАН

С.В. Троицкий

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Мюоны в составе широких атмосферных ливней (ШАЛ) относятся к одной из проникающих компонент, которая дает возможность получать информацию как о химическом составе первичного космического излучения, так и о ядерных взаимодействиях, ответственных за возникновение и развитие ливней в атмосфере. Это в свою очередь дает возможность подойти к пониманию природы излома первичных космических лучей (ПКЛ). Важной задачей изучения адронной проникающей компоненты космических лучей в атмосфере является получение спектра первичных частиц и изучения широкого класса явлений, которые возникают при взаимодействии адронов с веществом. Предлагаемый в диссертации новый метод позволяет изучать обе эти компоненты с помощью одного детектора.

Цель работы

Целью диссертационной работы является:

- Создание методики для экспериментального изучения мюонов и адронов в составе ШАЛ с помощью мюонного детектора установки “Ковер-2”.
- Разработка алгоритма разделения мюонной компоненты ШАЛ от адронной.
- Апробация методики посредством измерения характеристик мюонной и адронной компонент ШАЛ, и сравнение этих результатов с мировыми данными.

Научная новизна создан мюонный детектор большой площади (175м^2) на основе пластических сцинтилляционных детекторов. Разработанная методика позволяет регистрировать как мюонную, так и адронную компоненту ШАЛ. Т.о., мюонный детектор можно использовать не только для регистрации мюонов, а также в качестве адронного детектора.

Практическая значимость работы состоит в том, что исследование электронной, мюонной и адронной компонент ШАЛ с помощью новой методики, позволит продвинуться в понимании природы излома первичного спектра в области $(3-5)10^{15}$ эВ, определить химический состав ПКЛ, надежно разделить ШАЛ, генерированные первичными ядрами или гамма-квантами.

Основные результаты, представленные к защите

1. Разработан, и создан мюонный детектор большой площади (175м^2) в составе установки “Ковер-2”.
2. Разработана методика разделения мюонной и адронной компонент ШАЛ в мюонном детекторе.
3. Результаты измерения характеристик мюонной компоненты ШАЛ с $E_\mu > 1\text{ГэВ}$:
 - 3.1. Функция пространственного распределения мюонов с энергией $E_\mu > 1\text{ГэВ}$;
 - 3.2. Зависимость среднего числа мюонов на ливень $\langle N_\mu \rangle$ от полного числа частиц N_e в ливне;
 - 3.3. Дифференциальное распределение по числу мюонов в ливне.
4. Измеренные характеристики адронной компоненты ШАЛ с $E_h > 25\text{ГэВ}$:
 - 4.1. Зависимость среднего числа адронов на ливень $\langle N_h \rangle$ от полного числа частиц N_e в ливне;
 - 4.2. Пространственное распределение адронов с энергией $E_h > 25\text{ГэВ}$;
 - 4.3. Экспериментальный дифференциальный спектр энерговыделений адронов в МД;
 - 4.4. Дифференциальное распределение по числу адронов ШАЛ с энергией $E_h > 25\text{ГэВ}$.

Апробация работы и публикации

Результаты, полученные в диссертационной работе, докладывались на следующих конференциях и семинарах:

- 29 Международная конференция по космическим лучам, 3-10 августа, 2005 года, Пуна, Индия;
- 30 Международная конференция по космическим лучам, 3-11 июля, 2007 года, Мерида, Мексика;
- 30 Всероссийская конференция по космическим лучам, 02-07 июля, 2008 года, г. Санкт-Петербург;
- 21 международный симпозиум по космическим лучам, 09-12 сентября, 2008 года, г. Кошице;
- 31 Всероссийская конференция по космическим лучам, 05-09 июля, 2010 года, г. Москва.
- 1 Workshop по космическим лучам, 14-18 сентября, 2007 года, г. Ереван;
- 2 Workshop по космическим лучам, 12-16 сентября, 2011 года, г. Ереван.
- Семинары Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН.

По теме диссертации опубликовано 11 работ, 4 из них опубликованы в реферируемых журналах.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит 110 страниц текста, 52 рис., 2 табл., списка цитируемой литературы из 118 названий.

Личный вклад диссертанта

Автор принимал участие в создании мюонного детектора большой площади. Представленные результаты получены либо самим автором, либо при непосредственном его участии.

Содержание работы

Во введении дается интерпретация широких атмосферных ливней и генерации их от ПКЛ. Основными компонентами ШАЛ являются электронная, мюонная и адронная. Многие свойства ливня зависят от сечений взаимодействия адронов, от множественности и спектра вторичных частиц. Исследование пространственного распределения ливневых частиц необходимо в первую очередь потому, что без знания его невозможно определить полное число ливневых частиц той или иной природы и восстановить энергию первичной частицы. Особый интерес представляет - анализ мюонной компоненты ШАЛ при разных значениях параметра возраста, в частности, исследование средней ФПР мюонов и спектра по числу мюонов. Параметр возраста s позволяет оценить соотношение между уровнем наблюдения и максимумом развития ливня в атмосфере (уровень развития электронно-фотонного каскада), начиная с которого преобладающими в ливне становятся процессы диссипации энергии, т.к. средняя энергия ливневых частиц становится меньше критической энергии для воздуха, равной $\sim 10^8$ эВ. Изучение состава первичного космического излучения в области до и после излома может дать ответ на его природу. Один из путей получения такой информации состоит в использовании данных электронной, мюонной и адронным компонент. Поток адронов КЛ в атмосфере состоит в основном из нуклонов и мезонов, образующихся в неупругих взаимодействиях первичных адронов с ядрами атомов воздуха, а также протонов и нейтронов, проскочивших толщу атмосферы без взаимодействия. В первом случае адроны обычно сопровождаются генетически связанными частицами. Наблюдаемая при этом плотность сопровождения, обусловлена характеристиками взаимодействия, например, распределением по поперечному импульсу, энергии переданной частицам сопровождения и, очевидно, зависит от глубины взаимодействия. Распределение этих величин задается сечением и инклюзивными спектрами рождения адронов в области фрагментации. Для проскочивших частиц такое сопровождение отсутствует.

Интенсивность этой компоненты на данной глубине в атмосфере обусловлена только величиной полного сечения взаимодействия.

В первой главе приводятся экспериментальные результаты по мюонной и адронной компонентам ШАЛ, полученных на разных ливневых установках как ранее, так и в последнее десятилетие. Рассматриваются результаты таких установок, как ливневые установки НИИЯФ МГУ, Тянь-Шань, EAS-TOP, KASCADE, которые сравниваются между собой. Известно, что необходимо изучать состав первичного космического излучения в области до и после излома, чтобы понять его природу. Наиболее естественный путь получения такой информации состоит в том, чтобы использовать экспериментальные данные по электромагнитной, мюонной и адронной компоненте ШАЛ. На ливневой установке МГУ за период 1984-1990 годы была получена большая статистика ливней, которая содержит данные о мюонной и электронной компонентах в интервале первичных энергий от 10^{15} до $5 \cdot 10^{17}$ эВ. Это дало возможность, используя современную модель адронных взаимодействий QGSJET, сделать ряд заключений о массовом составе ПКЛ. Увеличение потока мюонов в мощных ливнях, возможно, отражает увеличение доли тяжелых ядер после излома ПКЛ. На основе полученных экспериментальных функций пространственного распределения (ФПР) мюонов была уточнена зависимость среднего числа мюонов ШАЛ от полного числа электронов в области больших значений числа частиц, и зависимость средней плотности мюонов от числа электронов на фиксированном расстоянии от оси ливней. Полученные данные по мюонной компоненте ШАЛ подтверждают сделанное ранее заключение об утяжелении состава ПКЛ в области за изломом.

Поток адронов космических лучей был измерен с помощью адронного калориметра установки EAS-TOP. Адронный спектр хорошо аппроксимируется степенным законом в диапазоне энергий от 30ГэВ до 30ТэВ:

$$S_h(E_h) = (2.25 \pm 0.21) \times 10^{-7} \times \left(\frac{E_h}{1000} \right)^{(-2.79 \pm 0.05)} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1} \text{ ГэВ}^{-1} \quad (1)$$

Величина энергии адронов E_h дается в ГэВ.

Чтобы решить проблему излома необходимо измерять спектр по числу частиц всех ливневых компонент. Ливневая установка KASCADE измеряет спектры по числу частиц электромагнитной, мюонной и адронной компонент ШАЛ. На адронном калориметре было измерено число адронов и их суммарная энергия в ШАЛ для спектра первичных частиц в диапазоне энергий (0.2-50) ПэВ. По этим двум измеренным величинам был получен спектр по числу адронов (рис.1). Излом дифференциального спектра по числу адронов проявляется вокруг числа 65. Данные могут быть описаны степенным законом: $dN/dN_H \propto N_H^\beta$ с $\beta_1 = -2.81 \pm 0.04$ ниже и $\beta_2 = -3.12 \pm 0.11$ выше излома. Согласно данным розыгрыша по программе CORSIKA для первичного спектра положение излома соответствует области ПКЛ от 2 ПэВ до 5 ПэВ.

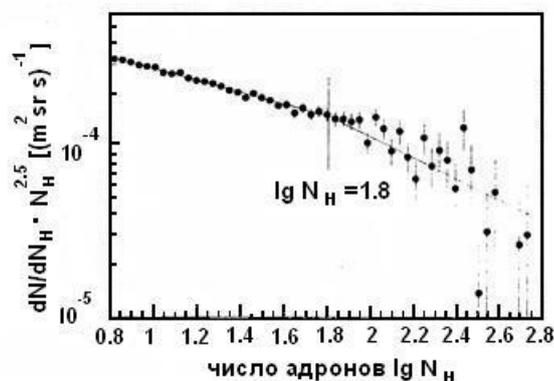


Рис.1. Адронный спектр по числу частиц(KASCADE)

Во второй главе дается описание установки “Ковер-2”. Изложены следующие сведения: описание жидкостного детектора и каналов информации, получаемых от детекторов (п.2.1), описание пластического детектора (п.2.2), описание мюонного детектора (п.2.3), блок-схема эксперимента (п.2.4) с описанием того, как соби-

рается и формируется информация, поступающая по различным каналам от детекторов и других контрольно-измерительных устройств, усиление детектора, питающие напряжения. Центральная часть установки “Ковер-2” состоит из 400 детекторов на жидком сцинтилляторе. Размер детектора $70 \times 70 \times 30 \text{ см}^3$. В детекторе используется фотоумножитель ФЭУ-49. Каждый индивидуальный жидкостный детектор измеряет энерговыделение в диапазоне 10-5000 релятивистских частиц (р.ч.), где 1р.ч. – наиболее вероятное энерговыделение в детекторе от одиночных мюонов (ε_μ). Для данного типа детектора $\varepsilon_\mu = 50$ МэВ. Детекторы размещены в горизонтальной плоскости, поставлены вплотную друг к другу, и покрывают площадь квадрата $S=196 \text{ м}^2$. Информация от каждого детектора снимается по четырем каналам: анодный сигнал, сигнал с 7-го диода ФЭУ, сигнал с 12-го диода ФЭУ; анодный ток ФЭУ. Ранее суммирование анодных сигналов “Ковра” осуществлялось пассивными сумматорами (суммирующие трансформаторы). Амплитуда импульса, соответствующая наиболее вероятному значению энерговыделения в детекторе после прохождения цепи суммирования, составляла всего ~ 5 мВ. Для того чтобы уменьшить влияние аппаратных помех и помех от силовой электросети, необходимо было повысить уровень сигнала в 4.5 раза, и, соответственно, во столько же раз повысить отношение сигнал/шум. Анодные сигналы с ФЭУ детекторов “Ковра” объединены в модули по 16 штук (4×4) активными сумматорами. Число таких модулей равно 25. Суммирование 25 модулей осуществляется на пассивном сумматоре. Для определения направления прихода ливней на этой установке используются сигналы шести выносных пунктов (ВП), каждый из которых состоит из 18 детекторов аналогичных детекторам на “Ковре”. Для опроса и записи информации на установке “Ковер-2” используются триггеры М1 и М2. Триггер М1 создается при совпадении импульсов от 4-х ВП, расположенных на расстояниях 30м от центра “Ковра”, с сигналом от “Ковра”. Этот триггер отбирает ШАЛ от первичных частиц с

энергиями $E_0 > 10^{14}$ эВ. Частота таких событий ~ 1.2 Гц. Триггер М2 создается сигналом от энерговыделения в “Ковре”, с порогом 2.5 ГэВ.

Логарифмический LC-преобразователь используется для измерения плотности ливневых частиц в детекторе. Сигнал с седьмого динода ФЭУ жидкостного детектора подается на вход логарифмического преобразователя, формируя импульс с отрицательной полярностью и постоянной амплитуды ~ 2 В с длительностью от 5 до 490 мкс, пропорционального логарифму амплитуды входного сигнала. Наклон характеристики преобразователя составляет 11.2%. Динамический диапазон преобразователя $\sim 5 \cdot 10^3$, а диапазон регулировки уровня дискриминации ~ 2 . Сигналы с логарифмических преобразователей подаются на входы каналов Годоскопа Амплитудных Каналов (ГАК). Частота тактовых импульсов ГАК 10 МГц и каждый канал позволяет измерять длительность входных импульсов в диапазоне от 5 до 490 мкс. Годоскоп амплитудных каналов является промежуточным устройством памяти, осуществляющим параллельное запоминание значений амплитуд детекторов и последовательный опрос каналов записи и вывода информации на on-line компьютер. При наличии триггеров М1 и М2 происходит опрос и запись информации 400 каналов годоскопа. Кроме амплитуд 400 детекторов сюда же в стандартизованном виде записывается информация об амплитуде сигналов с ВП, о задержках импульсов с этих пунктов относительно старта “Ковра”. Измерение анодного тока ФЭУ используется для настройки детекторов по усилению, а также для контроля над стабильностью усиления детектора. Регулировка коэффициента усиления ФЭУ осуществляется изменением потенциала на третьем диноде ФЭУ. Измерение анодного тока производится с помощью измерителя тока с точностью менее 1%.

Мюонный детектор установки “Ковер-2” расположен на расстоянии 48м от геометрического центра “Ковра” и представляет собой вытянутую плоскость размером 5×35 м, состоящую из 175 стандартных сцинтилляционных пластических детекторов с площадью 1м² каждый. Каждый детектор состоит из четырех пластических сцинтилляторов размером 0.5×0.5×0.05м³, помещенных в светозащитный кожух. Анодные сигналы суммируются по группам, образуя 5 модулей по 35 детекторов. Каждый индивидуальный пластический детектор измеряет энерговыделение в диапазоне 0.5-100р.ч., где 1 р.ч. есть наиболее вероятное энерговыделение в

пластическом детекторе от одиночных мюонов (ε_μ). Для данного типа детектора $\varepsilon_\mu = 10$ МэВ.

В третьей главе диссертации описывается методика разделения мюонной и адронной компонент ШАЛ.

На мюонном детекторе при исследовании мюонной компоненты ШАЛ, были зарегистрированы события с энерговыделениями более 100 МэВ в пластическом детекторе, что соответствует 10 р.ч. Для объяснения этих событий было предложено, что они имеют адронное происхождение. Действительно, толщина поглотителя МД (~20 радиационных единиц) достаточно велика для того, чтобы поглотить электромагнитную компоненту, но данной толщины поглотителя (всего лишь ~ 5 пробегов для взаимодействия) недостаточно для поглощения адронных каскадов. Поэтому каскады, рожденные идущими в составе ШАЛ адронами, развиваются в поглотителе над МД и дают дополнительное энерговыделение ε в сцинтилляторе (рис.2).

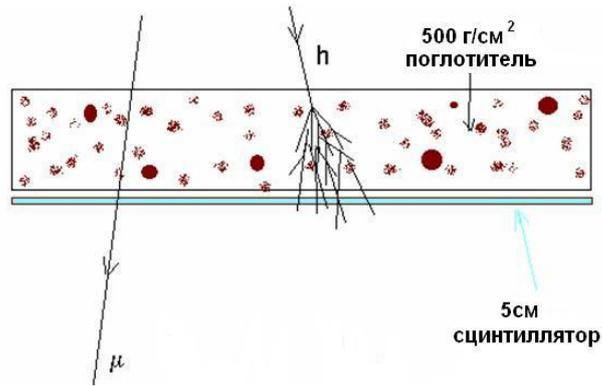


Рис.2. Схема прохождения мюонов и адронов через МД.

Характеристики событий в МД от одиночных адронов (протонов и π -мезонов) получены с помощью моделирования Монте-Карло. Расчеты проведены для адронов с фиксированными энергиями в диапазоне 5ГэВ-500ГэВ для четырех значений зенитного угла: $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ и 45° .

Они показывают, что события с большими энерговыделениями соответствуют адронам с энергией $E_h > 50$ ГэВ и с энерговыделением в пластическом детекторе $\varepsilon > 100$ МэВ. Т.е. адроны ШАЛ генерируют каскады

в поглотителе МД, которые регистрируют пластические детекторы МД. Причем, расчеты показывают, что радиус каскадного пятна не превосходит 1.3м.

Рассмотрим величину:

$$k = \frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon_{\mu} \cdot \sec \theta}, \quad (2)$$

которая представляет собой отношение среднего дополнительного энерговыделения от одиночного адрона $\bar{\varepsilon}$ к наиболее вероятному значению энерговыделения от одиночного мюона. В формуле (2) для мюонов учитывается увеличение пробега в слое сцинтиллятора с ростом зенитного угла θ . На рис.3 приведена зависимость величины k от энергии E_h адрона для четырех значений зенитного угла θ .

Как видно из рисунка, для событий близких к вертикали ($\theta \leq 30^\circ$), и при энергиях адронов $E_h \geq 25$ ГэВ, среднее энерговыделение от адронов превышает в пять раз энерговыделение от мюонов. В то же время, для событий с большими зенитными углами отделить адроны от мюонов можно лишь при энергиях адронов $E_h \geq 100$ ГэВ.

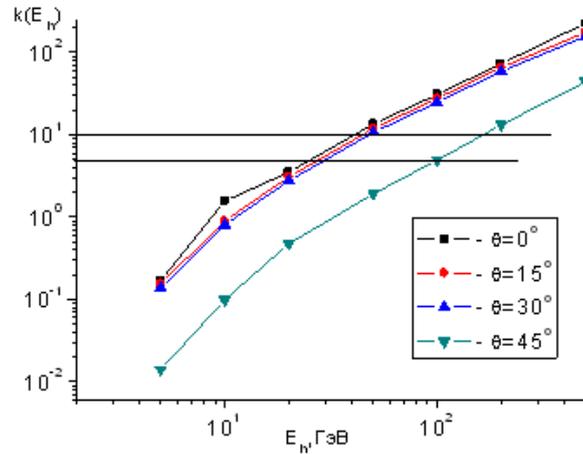


Рис.3. Зависимость отношения среднего дополнительного энерговыделения к наиболее вероятному энерговыделению одиночного мюона в слое сцинтиллятора МД от энергии адрона для разных зенитных углов

Доказательство надежности разделения мюонов и адронов в мюонном детекторе можно получить, если измерить пробег для поглощения компонент космических лучей, порождающих в МД события с различными порогами по энерговыделению в МД. Это было сделано посредством измерения барометрического коэффициента для событий с различными порогами по энерговыделению в МД. Для этого была получена зависимость барометрического коэффициента β от энерговыделения в интервале $\mathcal{E} = 1-12$ р.ч. Барометрический коэффициент измерялся для событий с различными порогами по энерговыделению в МД (рис.4). С сумматора 5 модуля МД установки “Ковер-2”, на который приходит сигнал от суммы анодов 35 пластических детекторов отрицательной полярности с амплитудой ~ 15 мв, подается на делитель, с коэффициентом деления сигнала в 1,1.5,2,3,4 и т.д. раз. Пороговое значение энерговыделения \mathcal{E} для каждого случая определялось в числе релятивистских частиц, используя интегральный спектр энерговыделений компонент космических лучей с пятого динода. Всего было получено 15 пороговых значений (рис.5).

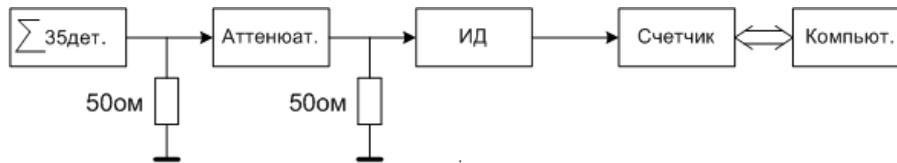


Рис.4. Блок-схема эксперимента для измерения барометрического коэффициента

Сигнал с делителя подается на интегральный дискриминатор (ИД), а затем поступает на счетчик стандарта САМАС. Т.е. записываются темп счета(I) и атмосферное давление(P), усредненные за четыре минуты, соответствующие данному уровню наблюдения. Измерение атмосферного давления производилось электрическим барометром типа Motorola – MDX4100A, с точностью измерения, равной 0.2 мм рт. ст. По записанной информации определялся барометрический коэффициент β для соответствующего энергетического порога по формуле (3), а относительная ошибка β определялась по формуле (6).

$$\beta = r(\sigma_x / \sigma_y), \quad (3)$$

где

$$\sigma_x^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n}, \quad \sigma_y^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n}, \quad (4)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n\sigma_x\sigma_y}, \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i; \quad (5)$$

$$\Delta\beta/\beta = \pm(1/r)\sqrt{(1-r^2)/(n-3)} \quad (6)$$

В таблице 1 приводятся результаты измерений барометрических коэффициентов β для разных пороговых энерговыделений в пластических детекторах МД от компонент космических лучей.

Таблица 1

ϵ [р.ч.]	β [%/мм рт. ст.]	$\delta\beta/\beta$	L [г/см ²]	$\delta L/L$	β [%/mbar]	$\delta\beta/\beta$
0.3	-0.16	0.03	831.25	148.96	-0.12030	0.02256
1.0	-0.18	0.02	739.48	82.00	-0.13534	0.04511
1.3	-0.22	0.04	605.15	110.39	-0.16541	0.03008
1.6	-0.34	0.09	391.02	103.74	-0.25564	0.06767
2.1	-0.60	0.06	222.11	22.61	-0.45113	0.04511
2.9	-0.60	0.09	222.11	23.94	-0.45113	0.06767
3.1	-0.56	0.06	236.74	22.61	-0.42105	0.04511
4.0	-0.77	0.30	171.57	66.60	-0.57895	0.22556
5.0	-0.84	0.20	158.30	37.70	-0.63158	0.15038
6.0	-0.94	0.14	141.50	21.10	-0.70677	0.10526
6.8	-0.84	0.25	158.27	46.55	-0.63158	0.18797
8.0	-1.05	0.07	126.60	8.50	-0.78947	0.05263
9.0	-0.74	0.19	179.55	46.55	-0.55639	0.14286
10.5	-0.95	0.19	139.65	27.93	-0.71429	0.14286
12.0	-1.13	0.07	117.04	7.10	-0.84962	0.05263

Если барометрический коэффициент β выражен в %/мб, то пробег для поглощения (г/см^2) может быть получен как

$$L = -100\% / \beta \quad (7)$$

В таблице 1 приводятся также значения пробега для поглощения при разных значениях β , определенные по формуле (7).

Как видно из рис.5, для событий с $\varepsilon \geq 5$ р.ч. (50 МэВ) среднее значение пробега для поглощения становится постоянным и равным $\langle L \rangle = (144.2 \pm 49.8) \text{г/см}^2$. Такое значение $\langle L \rangle$ практически совпадает с пробегом для поглощения адронов. Из рис.5 следует, что в области энерговывделений $\varepsilon < 5$ р.ч. значение L быстро растет с уменьшением ε и при $\varepsilon = 1.3$ р.ч. оно равно $L \approx 590 \text{г/см}^2$, что соответствует барометрическому коэффициенту $\beta = -0.22\%/\text{мм рт. ст.}$ Из этой же зависимости также следует, что барометрическому коэффициенту $\beta = -0.34\%/\text{мм рт. ст.}$ с энерговывделением $\varepsilon = 1.6$ р.ч. соответствует длина поглощения $L = 391 \text{г/см}^2$. Ранее на установке "Ковер" был получен барометрический коэффициент β для мюонов с пороговой энергией 0.5 ГэВ равным $\beta = -0.36 \pm 0.01\%/\text{мм рт.ст.}$, которому соответствует длина поглощения $L = 357 \text{г/см}^2$.

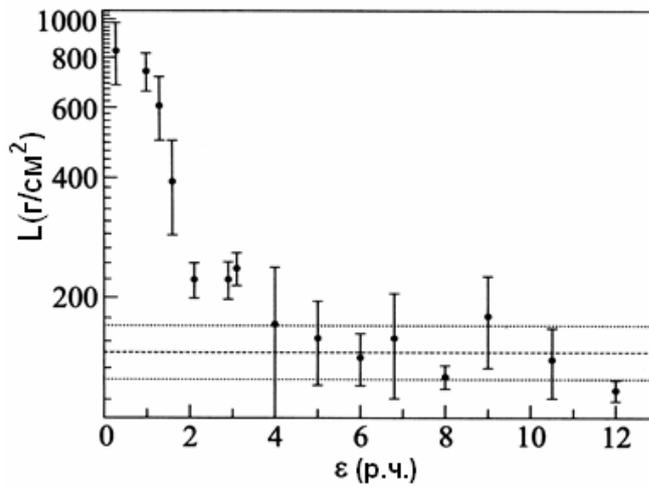


Рис.5. Зависимость длины пробега для поглощения L от энергетического порога, выраженного в числе релятивистских частиц

Сравнение наших данных с этой величиной показывает, что они становятся равными при $\varepsilon = 1.6$ р.ч. Отсюда следует, что при $\varepsilon \leq 1.3$ р.ч. основной вклад в спектр энерговыделений вносит мюонная компонента. Расчет по программе CORSIKA (QGSJET01+GHEISHA) для первичных протонов показывает, что при попадании оси ливня на центральную часть установки “Ковер-2” для $N_e = 10^5 - 10^6$, энерговыделение ε в индивидуальных детекторах МД от мюонов с энергией $E_\mu > 1$ ГэВ не превосходит 3 р.ч. Т.е. экспериментальный результат не противоречит расчетному. Расчеты также показывают, что из 1000 разыгранных ливней в диапазоне: $N_e = 10^5 - 10^6$ при условии что ось ливня лоцируется в “Ковер”, отношение числа мюонов ($E_\mu > 1$ ГэВ) с энерговыделением $\varepsilon > 5$ р.ч. к числу адронов с таким же энерговыделением для адронов с $E_h > 25$ ГэВ составляет $\sim 3.2 \cdot 10^{-3}$. Т.е., вклад мюонов незначителен при регистрации ливневых адронов.

В четвертой главе приводятся характеристики мюонной компоненты ШАЛ с $E_\mu > 1$ ГэВ и характеристики адронной компоненты ШАЛ с $E_h > 25$ ГэВ, полученные с помощью разработанной методики.

Экспериментальные данные сравниваются с данными таких установок как EAS-TOP, KASCADE, Ooty, AKENO. С использованием прямого метода исследования пространственного распределения, было получено пространственное распределение мюонов в узком диапазоне расстояний 39-56 м от оси ливня и с полным числом частиц в ливне: $N_e = 10^5 - 10^6$, когда ось лоцируется на “Ковер”. Пространственное распределение мюонов измерено довольно точно, т. к. центральная часть установки “Ковер” определяет ось ливня с точностью $\Delta x_o = \Delta y_o = 0.35$ м. Результаты расчета для ФПР мюонов, полученные по программе CORSIKA(QGSJET01+GHEISHA) для первичных протонов и ядер железа не противоречат экспериментальным данным установки “Ковер-2”. На рис.6. приводится сравнение ФПР для мюонов, полученных на ливневых установках EAS-TOP, Ooty и AKENO с данными установки “Ковер-2”. Причем, установка “Ковер-2” расположена на высоте 1700 м над уровнем моря, а установки EAS-TOP, Ooty и AKENO на высоте 2005 м, 2200 м и 900 м над уровнем моря соот-

ветственно. Данные установки AKENO приведены к уровню установки Ooty.

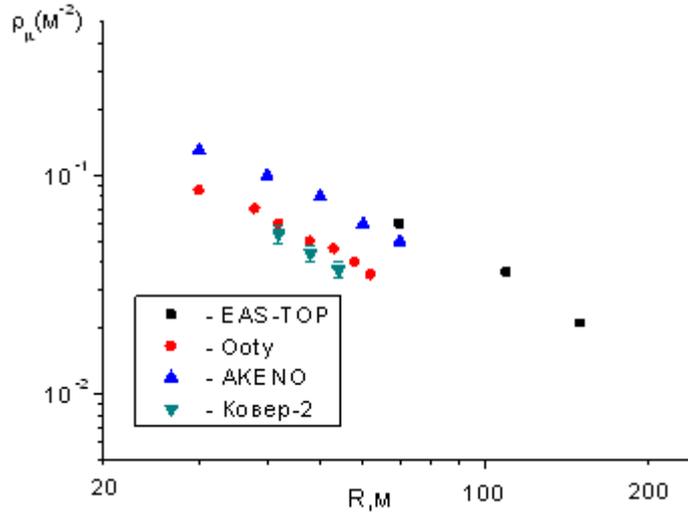


Рис.6. Сравнение пространственных распределений мюонов ШАЛ по данным ливневых установок: “Ковер-2”, EAS-TOP, Ooty и AKENO

Из рис.6 следует, что результаты по ФПР мюонов, полученные на установке EAS-TOP, Ooty и AKENO, качественно не противоречат экспериментальным данным установки “Ковер-2”. Получена нами зависимость среднего числа мюонов (рис.7) на ливень $\langle N_\mu \rangle$ от полного числа частиц в ливне N_e для $N_e = 10^5 - 10^6$, которая аппроксимируется степенным законом $\langle N_\mu \rangle \sim N_e^\alpha$ с показателем $\alpha = 0.73 \pm 0.09$.

На ливневой установке EAS-TOP была получена зависимость среднего числа мюонов от полного числа частиц в ливне. Аппроксимация этой зависимости степенным законом дает значение $\alpha \approx 0.75$, что согласуется хорошо с нашим значением $\alpha = 0.73 \pm 0.09$. Расчеты по программе CORSIKA(QGSJET01+GHEISHA) для первичных протонов дают значение $\alpha = 0.78 \pm 0.02$. Полученное значение показателя степенного спектра по результатам розыгрыша для первичных протонов не противоречит нашему значению $\alpha = 0.73 \pm 0.09$.

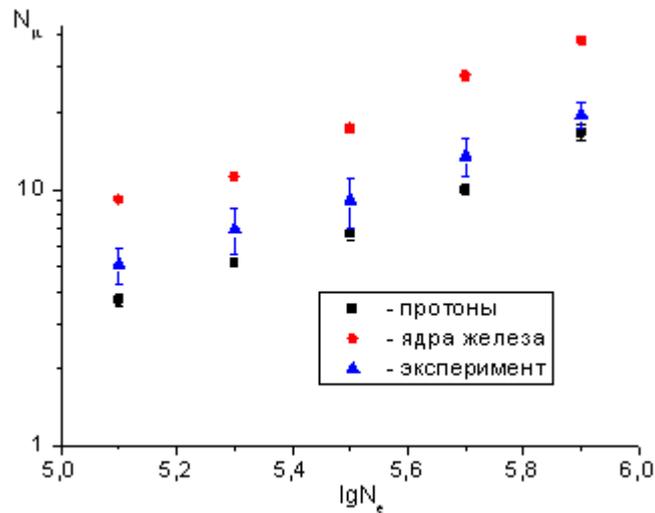


Рис.7. Сравнение экспериментальных данных и результатов расчета для зависимости $N_{\mu} - N_e$

По экспериментальным данным МД было получено дифференциальное распределение по числу мюонов на ливень. Это распределение можно аппроксимировать степенным законом $dN/dN_{\mu} \sim N_{\mu}^{\beta}$, $\beta = -2.88 \pm 0.08$. Этот результат сравнивается с результатом расчета для первичных протонов. При этом значение показателя расчетного дифференциального спектра $\beta = -3.00 \pm 0.09$. На ливневых установках EAS-TOP и KASCADE ранее были получены дифференциальные распределения по числу мюонов, которые аппроксимировались также степенным законом. Значения показателя степенного закона для установок EAS-TOP и KASCADE равны $\beta \approx -3.12$ и $\beta \approx -2.80$ соответственно. Т.е. экспериментальные результаты ливневых установок EAS-TOP и KASCADE не противоречат данным установки “Ковер-2”. По результатам эксперимента был получен дифференциальный спектр энерговыделений (рис.8) для адронов с энерговыделением $\mathcal{E} > 50 \text{ МэВ}$ в пластическом детекторе, когда ось ливня попадает в “Ковер” и полное число частиц в ливне: $N_e = 10^5 - 10^6$.

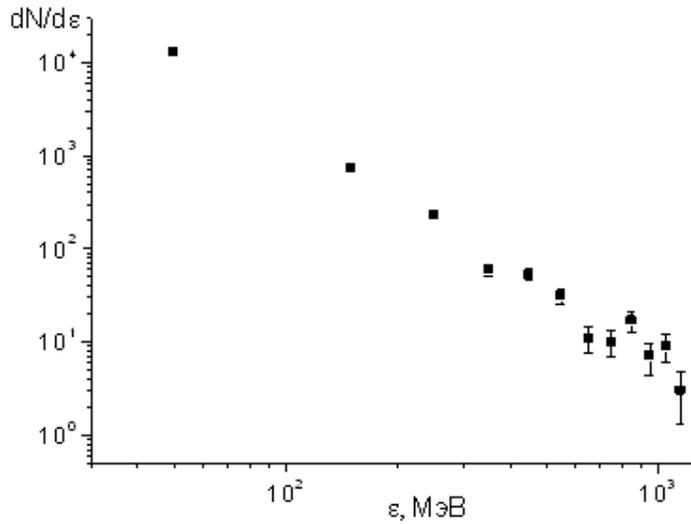


Рис.8. Дифференциальный спектр энерговыделений, измеренный на мюонном детекторе

Этот спектр описывается степенным законом $dN/d\varepsilon \sim \varepsilon^{-\gamma}$. Значение показателя степенного спектра $\gamma = 2.58 \pm 0.08$. Согласно выполненным расчетам по программе CORSIKA(QGSJET01+GHEISHA), был получен дифференциальный энергетический спектр адронов для первичных протонов, когда ось ливня попадает в “Ковер” и полное число частиц в ливне: $N_e = 10^5 - 10^6$. Этот дифференциальный энергетический спектр описывается степенным законом $dN/dE_h \sim E_h^{-\gamma}$, причем значение $\gamma = 2.68 \pm 0.04$. Т.е. результаты расчета не противоречат результатам эксперимента

Была получена зависимость среднего числа адронов $\langle N_h \rangle$ на ливень с энергией $E_h > 25$ ГэВ от полного числа частиц $N_e = 10^5 - 10^6$ в ливне, которая описывается степенным законом $\langle N_h \rangle \sim N_e^\alpha$, где $\alpha = 0.89 \pm 0.08$. Результаты розыгрыша по программе CORSIKA(QGSJET01+GHEISHA) для первичных протонов дают значение $\alpha = 0.91 \pm 0.07$, а для первичных ядер железа дают значение

$\alpha = 1.11 \pm 0.09$. Результаты расчета не противоречат экспериментальным результатам. Не наблюдается противоречия этих результатов с данными работ по изучению адронов в составе ШАЛ на высотах гор. В этих работах была получена зависимость полного числа адронов в ливне от полного числа частиц в ливне с $N_e = 10^5 \div 10^6$ со значением $\alpha = 0.8 \div 0.9$.

ФПР для адронов с энергией $E_h > 25$ ГэВ, в диапазоне расстояний (39-56)м от центра МД до оси ливня (ось ливня лоцируется на “Ковер”) с полным числом частиц в ливне $N_e = 10^5 - 10^6$ и $0^\circ < \theta < 30^\circ$, была получена аналогично ФПР для мюонов. ФПР для адронов была получена в расчете по программе CORSIKA(QGSJET01+GHEISHA) для первичных протонов и ядер железа. Результаты расчета не противоречат экспериментальным результатам, полученным на ливневой установке “Ковер-2”. На рис.9 приводится качественное сравнение ФПР для адронов ШАЛ, измеренных на установках “Ковер-2” и KASCADE.

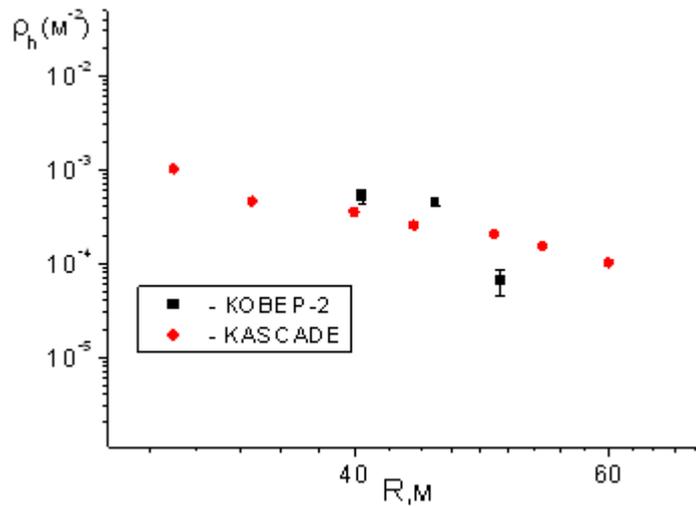


Рис.9. Сравнение ФПР адронов, полученных на установке “Ковер-2” и адронном калориметре установки KASCADE.

Функция пространственного распределения для адронов была получена на адронном калориметре ливневой установки KASCADE с пороговой энер-

гией для адронов $E_{th}=50\text{ГэВ}$, с усеченным числом мюонов в ливне $4.3 < \lg N_{\mu}^{tr} < 4.6$ и с зенитными углами: $0^{\circ} < \theta < 18^{\circ}$. С учетом того, что установка KASCADE расположена на высоте 110м над уровнем моря, из рис.10 следует, что экспериментальные результаты по ФПР для адронов, полученные на установке KASCADE, качественно не противоречат результатам по ФПР для адронов, полученных на установке “КОВЕР-2”.

Был также исследован класс событий, который отбирался при условии собственного триггера МЗ мюонного детектора. Он вырабатывается схемой совпадения любых 3-х модулей из пяти. Результаты расчета по программе CORSIKA(модель HDPM), показывают, что этот триггер создается ливнями с $E_o > 10$ ТэВ для первичных протонов и с $E_o > 100$ ТэВ для ядер железа с осями в круге радиусом $r=10$ м вблизи МД. Для этих ливней было получено дифференциальное распределение по числу адронов в интервале 1-40 адронов, которое описывается степенным законом $dN / dN_h \sim N_h^{\beta}$, где $\beta = -2.80 \pm 0.06$ (рис.10).

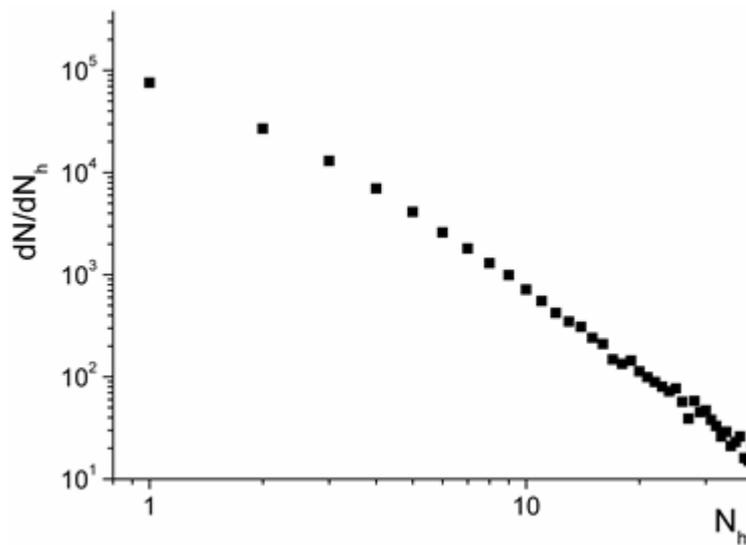


Рис.10. Дифференциальное распределение по числу адронов в МД

Этот спектр можно интерпретировать, как спектр ШАЛ по числу адронов идущих вблизи стволов ливней. На установке KASCADE было измерено дифференциальное распределение по числу адронов ($E_h > 50$ ГэВ) вблизи осей ливней, которое описывается степенным законом с показателем спектра $\beta = -2.81 \pm 0.05$. Откуда следует, что измеренное дифференциальное распределение по числу адронов в МД повторяет дифференциальное распределение по числу адронов в широких атмосферных ливнях, измеренное на установке KASCADE. Это в свою очередь доказывает возможность регистрации их в составе ШАЛ, когда оси ливней локализованы вблизи мюонного детектора.

В заключении подведены итоги работы, и сформулированы основные результаты и вывод.

Основные результаты работы

1. Создан мюонный детектор с большой площадью (175м^2) на основе пластических сцинтилляционных детекторов.
2. Разработана методика разделения адронной и мюонной компонент ШАЛ.
3. Получена функция пространственного распределения по экспериментальным данным установки Ковер-2 для мюонов с энергией $E_\mu > 1$ ГэВ.
4. Получена зависимость среднего числа мюонов на ливень $\langle N_\mu \rangle$ от полного числа частиц N_e в ливне.
5. Получено дифференциальное распределение по числу мюонов.
6. Получена зависимость среднего числа адронов $\langle N_h \rangle$ от полного числа частиц N_e в ливне.
7. Получено пространственное распределение адронов ШАЛ с $E_h > 25$ ГэВ и с полным числом частиц в ливне: $N_e = 10^5 - 10^6$.
8. Измерен дифференциальный спектр энергосодержаний адронов в мюонном детекторе.
9. Получено дифференциальное распределение по числу адронов ШАЛ с $E_h > 25$ ГэВ.

Основные публикации по теме диссертации

1. Е.Н. Алексеев, В.В. Алексеенко, Н.А. Алексеенко, А.В. Воеводский, Д.Д. Джаппуев, Ю.Н. Коновалов, М.М. Конопля, А.У. Куджаев, Д.Л. Марчук, Ю.В. Маловичко, В.В. Скляр, Ю.В. Стенькин, В.А.Тизенгаузен, А.Е. Чудаков. Мюонный детектор установки “Ковер-2”. Известия Академии наук, Серия Физическая, т.57, №4, стр.167-170, 1993.
2. Alexeenko N.A, Alexeenko V.V., Alexeyev E.N, Chudakov A.E., Dzhappuev D.D., Kononov Yu.N., Kudzhaev A.U., Marchuk D.L., Ozrokov S. Kh., Sklyarov V.V., Sten'kin Yu. V., Tizengauzen V.A.,Voevodsky A.V. Baksan Carpet-2 Large area muon detector, 23rd ICRC, v. 2, 1993, p. 477.
3. Е.Н. Алексеев, В.Н. Алексеенко, Г.Х. Архестов, А.В.Воеводский Д.Д. Джаппуев, Ю.Н. Коновалов, А.У. Куджаев, Д.Л. Марчук, С.Х. Озроков, Ю.В. Стенькин, В.А. Тизенгаузен, А.Е. Чудаков. О мюонном детекторе на установке Ковер. Труды 5 Школы “Частицы и космология” Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ АН СССР.1991.стр.88-94.
4. D.D. Dzhappuev, A.U. Kudzhaev, A.S. Lidvansky et al. Proc.29th ICRC, Pune, 2005, v.6, p.233-236.
5. D.D. Dzhappuev, V.V. Alekseenko, A.S. Lidvansky et al. Proc.30th ICRC, 303, Merida (Mexico), 2007.
6. Д.Д. Джаппуев и др. Модернизация установки “Ковер-2“ БНО ИЯИ РАН. Изв. РАН. Серия Физическая, 2007, т.71, №4, стр. 542-544.
7. D.D. Dzhappuev, A.B. Chernyev, A.U. Kudzhaev, A.S. Lidvansky, O.I. Mikhailova, V.B. Petkov, Yu.V. Sten'kin. Study for hadronic component with hadron energy $>50\text{GeV}$ at “Carpet-2” EAS array, Proceedings of the ICRC Workshop “Aragats 2007”, Armenia, 2007, p. 8-13.
8. D.D. Dzhappuev, A.U. Kudzhaev, N.F. Klimenko, O.I. Mikhailova, V.I. Stepanov, A.L. Tsyabuk, A study of hadrons and muons in EAS at the “Carpet-2” shower array, Proceedings of 21st European Cosmic Ray Symposium, Kosice, Slovakia, 2008, p.546.
9. Джаппуев Д.Д., Куджаев А.У., Алексеенко В.В, Клименко Н.Ф., Лидванский А.С., Михайлова О.И., Петков В.Б., Стенькин Ю.В., Цябук А.Л. и Черняев А.Б., Исследование мюонной и адронной ком-

понент широких атмосферных ливней на установке “Ковер-2” Изв. РАН, Серия Физическая, 2009, т.73, №5, стр. 642-644.

10. A.U. Kudzhaev, D.D. Dzhappuev, O.I. Mikhilova and V.B. Petkov, Investigation of the muonic and hadronic components of Extensive Air Showers at the 1GeV muon detector of the “Carpet-2” shower array. Proceeding of the 2nd International Cosmic Ray Workshop “Aragats 2011”, 2011, Armenia, p. 126-130.
11. Д.Д.Джаппуев, А.У. Куджаев, А.С.Лидванский, В.Б. Петков, Ю.В Стенькин. Изучение адронной компоненты ШАЛ на установке “Ковер”. Письма в ЖЭТФ, 2013, т.97, №10, стр.651-653.

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,6 Зак. № 22324
Тираж 100 экз. Бесплатно
Отпечатано на компьютерной издательской системе
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований
Издательский отдел
Российской академии наук
117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а