

На правах рукописи



ДМИТРИЕВА Анна Николаевна

**ИНТЕНСИВНОСТЬ ПОТОКА И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
СПЕКТР МЮОНОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПОД
БОЛЬШИМИ ЗЕНИТНЫМИ УГЛАМИ**

01.04 16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Автор



15 МАЙ 2008

МОСКВА – 2008

Работа выполнена в Московском инженерно-физическом институте (государственном университете)

- Научный руководитель доктор физико-математических наук,
профессор
Петрухин Анатолий Афанасьевич,
МИФИ, г Москва
- Официальные оппоненты доктор физико-математических наук,
профессор
Базилевская Галина Александровна,
ФИАН, г Москва
- кандидат физико-математических
наук,
зав лабораторией
Лидванский Александр Сергеевич,
ИЯИ РАН, г Москва
- Ведущая организация Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения
радиоволн им Н В Пушкова,
г Троицк

Защита состоится «4» июня 2008 г в 16 час 00 мин на заседании диссертационного совета Д212 130 07 в МИФИ по адресу 115409, Москва, Каширское шоссе, дом 31, телефон 324-84-98

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ

Автореферат разослан «29» апреля 2008 г

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



С.Е.Улин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Исследования угловой и энергетической зависимости потока мюонов на поверхности Земли имеют важное значение для физики космических лучей (КЛ) Мюоны способны донести до уровня наблюдения информацию как о первичном космическом излучении, так и о процессах в атмосфере, влияющих на генерацию мюонов и определяющих их прохождение через атмосферу. Данные об абсолютной интенсивности мюонов важны для исследований энергетических спектров мюонов, поскольку они, как правило, нормируются на нее Во многих экспериментах мюоны являются фоновыми частицами и для оценки числа фоновых событий также необходимо знать поток мюонов

На поверхности Земли можно измерять потоки мюонов при очень больших зенитных углах, вплоть до 90° Однако большинство исследований интегральной интенсивности проводилось для вертикального направления, и существуют целые области по зенитным углам и пороговым энергиям, в которых экспериментальных данных вообще нет В исследованных областях для одинаковых пороговых энергий зависимость интегральной интенсивности от зенитного угла сильно отличается для разных экспериментов (до 20% и более) Для исследования широкой области по пороговой энергии и зенитному углу необходим детектор, способный измерять околоразнонаправленный поток мюонов при различных энергетических порогах с хорошей угловой точностью реконструкции треков Таким детектором является российско-итальянский координатный детектор ДЕКОР, входящий в состав экспериментального комплекса НЕВОД (МИФИ, Москва)

При решении различных прикладных задач, связанных с мониторингом состояния верхних слоев атмосферы, и в задачах по изучению вариаций космических лучей абсолютная интенсивность мюонов выступает в роли "стандартного" значения, относительно которого определяется изменение потока При этом необходимо также учитывать изменения интенсивности метеорологического характера (вносить поправки на барометрический и температурный эффекты) Барометрический эффект учитывается довольно просто –

одним параметром (значением давления на уровне регистрации), в то время как точно учесть температурный эффект введением поправки на приземную температуру невозможно. Необходимо знать дифференциальные температурные коэффициенты (ДТК), позволяющие вносить поправку в темп счета с учетом изменения температуры на всех высотах атмосферы. Расчеты ДТК проводились достаточно давно, когда точность вычислений ограничивалась недостаточной мощностью вычислительных средств и для облегчения расчетов вводились довольно грубые приближения. Поэтому использование таких ДТК для учета метеорологических эффектов может приводить к серьезным погрешностям при исследовании вариаций внеатмосферного происхождения.

Работы, вошедшие в диссертацию, выполнялись при поддержке программы "Развитие научного потенциала высшей школы в 2006-2008 гг." Рособразования на уникальной установке НЕВОД в рамках государственных контрактов с Роснаукой.

Цель работы

Измерение абсолютной интенсивности потока мюонов на поверхности Земли при больших зенитных углах в широком диапазоне пороговых энергий по данным координатного детектора ДЕКОР и оценка влияния на нее метеорологических условий.

Научная новизна

Измерена интегральная интенсивность атмосферных мюонов на поверхности Земли в широком диапазоне зенитных углов $20^\circ \leq \theta < 90^\circ$ и пороговых энергий от 1.5 до 7.2 ГэВ на одной установке, что минимизирует систематические неопределенности. Экспериментальные результаты в нескольких интервалах зенитных углов и пороговых энергий получены впервые.

Получена простая аналитическая формула зависимости интегральной интенсивности от зенитного угла, хорошо описывающая экспериментальные данные в диапазоне зенитных углов $20^\circ \leq \theta < 90^\circ$ и пороговых энергий от 0.3 до 7.2 ГэВ.

Получены новые значения ДТК для шестислойной сферической модели атмосферы, с учетом зависимости потерь от

энергии мюона и плотности воздуха, а также вклада распада каонов в поток атмосферных мюонов. Уточнения значительно изменяют зависимость ДТК от высоты атмосферы.

Практическая значимость

Результаты работы по измерению интегральной интенсивности могут быть использованы для проверки моделей прохождения космического излучения через атмосферу, особенно при больших зенитных углах, для оценки числа ожидаемых событий в мюонных детекторах и частоты фоновых событий в других экспериментах, а также в различных прикладных задачах, связанных с мониторингом состояния верхних слоев атмосферы.

Рассчитанные ДТК могут быть использованы для учета температурного эффекта в различных работах по исследованию вариаций потока космических лучей атмосферного и внеатмосферного происхождения.

Личный вклад автора

Автор участвовал в проведении длительного эксперимента (2003-2007 гг.) и статистического анализа экспериментальных данных. Автор внес определяющий вклад как в анализ экспериментального материала (выбор и оптимизация критериев отбора, оценка их эффективности, автоматизированный и визуальный отбор событий, построение распределений), так и в проведение расчетов (вычисление светосилы установки, расчет пороговых энергий мюонов и т.п.), необходимых для восстановления интенсивности мюонов. В результате автором лично были получены данные по интенсивности атмосферных мюонов на поверхности Земли при больших зенитных углах (в том числе в нескольких ранее неизученных диапазонах), а также простая аппроксимационная формула для расчета интегральной интенсивности, которая может быть использована для оценок потока мюонов.

Автором написан комплекс программ как для обработки экспериментальных данных (отбор событий, оценка эффективностей регистрации), так и для различных расчетов (светосила установки, пороговая энергия мюонов,

полуаналитический расчет и моделирование спектра мюонов, полуаналитический расчет интегральных и дифференциальных температурных коэффициентов)

Автор защищает

- методику анализа данных координатного детектора ДЕКОР для оценки интенсивности мюонов и методику оценки коэффициентов, учитывающих эффективность используемых критериев отбора,
- результаты расчета светосилы установки,
- полученные экспериментальные данные по интегральной интенсивности мюонов в интервале зенитных углов $20^\circ - 90^\circ$ и пороговых энергий от 1.5 до 7.2 ГэВ,
- аппроксимационную формулу, хорошо описывающую зависимость интегральной интенсивности потока мюонов от зенитного угла и пороговой энергии,
- рассчитанные дифференциальные температурные коэффициенты для мюонов космических лучей

Апробация работы и публикации

Результаты работы были представлены на российских и международных конференциях, в том числе Всероссийской конференции по космическим лучам (ВККЛ 2006), Европейском симпозиуме по космическим лучам (ECRS 2006), Международных конференциях по космическим лучам (ICRC 2005, 2007), опубликованы в их трудах, а также в журналах "Известия РАН. Серия физическая" и "Ядерная физика" (2005-2007) Перечень публикаций приведен в конце автореферата

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, и списка литературы Объем диссертации: 94 стр., 52 рис , 10 табл , 41 наименование цитируемой литературы

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность и важность исследований интенсивности потока и энергетического спектра мюонов космических лучей. Рассматриваются основные эксперименты по исследованию интегральной интенсивности мюонов. Обосновывается актуальность изучения влияния метеозффектов на поток мюонов и необходимость проведения новых расчетов дифференциальных температурных коэффициентов

В главе 1 описывается координатный детектор ДЕКОР, дается связь интегральной интенсивности с числом регистрируемых событий, описываются критерии отбора экспериментальных событий и методы определения эффективностей регистрации событий

Для исследования интегральной интенсивности в широкой области зенитных углов и пороговых энергий необходим детектор, способный одновременно измерять поток мюонов при различных энергетических порогах с хорошей угловой точностью реконструкции треков. Таким детектором является российско-итальянский координатный детектор ДЕКОР, входящий в состав экспериментального комплекса НЕВОД (ЭК НЕВОД), расположенного в МИФИ

Абсолютная интенсивность мюонов $I(\theta, \varphi, E_{\text{мин}})$ для зенитного θ и азимутального φ углов прихода частиц и пороговой энергии $E_{\text{мин}}$ рассчитывается по формуле:

$$I(\theta, \varphi, E_{\text{мин}}) = N(\theta, \varphi, E_{\text{мин}}) / (T \cdot \varepsilon_{\text{СМ1}} \varepsilon_{\text{СМ2}} S\Omega(\theta, \varphi, E_{\text{мин}})), \quad (1)$$

где $N(\theta, \varphi, E_{\text{мин}})$ – число событий, зарегистрированных в данных угловых и энергетическом интервалах, T – "живое" время измерений. Коэффициенты $\varepsilon_{\text{СМ1,2}}$ учитывают эффективность срабатывания отдельных супермодулей (СМ) пары. Величина $S\Omega(\theta, \varphi, E_{\text{мин}})$ – светосила установки, с учетом эффективности регистрации и реконструкции треков. В силу приближенной симметрии потока по азимутальному углу при фиксированных энергиях $E_{\text{мин}}$ и углах θ для получения зависимости по зенитному углу θ используются усредненные по азимутальному углу значения

ЭК НЕВОД включает черенковский водный калориметр НЕВОД, (бассейн объемом 2000 м^3 , в котором размещена пространственная решетка квазисферических модулей, регистрирующих черенковское излучение) и координатный

детектор большой площади ($\sim 115 \text{ м}^2$) – ДЕКОР (рис.1). Восемь супермодулей (СМ) ДЕКОР расположены в галереях вокруг бассейна (ДЕКОР-Б, $\sim 70 \text{ м}^2$) и четыре СМ над ним (ДЕКОР-В, $\sim 45 \text{ м}^2$) (рис.1).

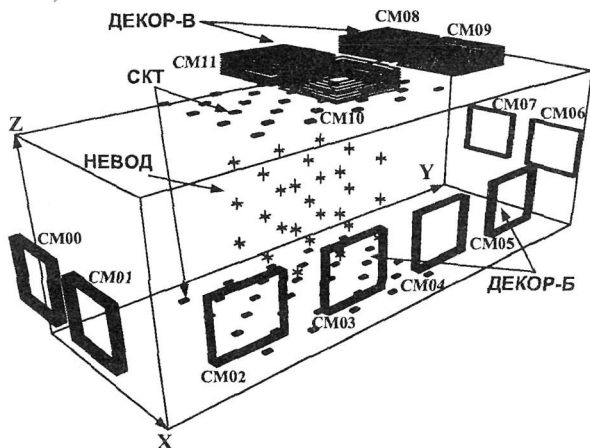


Рис.1. Экспериментальный комплекс НЕВОД-ДЕКОР.

Супермодуль боковой части детектора ДЕКОР представляет собой 8 параллельных плоскостей с размером чувствительной области $3.1 \times 2.7 \text{ м}^2$, подвешенных вертикально на расстоянии 6 см друг от друга. Каждая плоскость состоит из 16 камер. Супермодуль верхней части детектора ДЕКОР представляет собой 8 параллельных плоскостей с размером чувствительной области $3.1 \times 3.4 \text{ м}^2$, расположенных горизонтально на расстоянии 11.5 см друг от друга. Каждая плоскость состоит из 20 камер. Камеры, в свою очередь, включают по 16 газоразрядных трубок с внутренним сечением $0.895 \times 0.895 \text{ см}^2$. Камеры работают в режиме ограниченного стримера, который обеспечивается трехкомпонентной газовой смесью и подбором напряжения на анодных нитях. Анодные нити поддерживаются т.н. холдерами (чтобы не допустить провисания нити) – специальными пластмассовыми пластинами шириной 5 мм, расположенными внутри камер на расстоянии ~ 48.5 см друг от друга и симметрично относительно центра камеры. К каждой плоскости прикреплены внешние пластины с алюминиевыми полосками – стрипами с шагом 1 см (вдоль камер – "X"-проекция) и 1.2 см (поперек камер – "Y"-проекция), с которых производится съем информации.

В отличие от боковой части детектора в супермодулях ДЕКОР-В стрипы четных и нечетных плоскостей "Y"-проекции дополнительно повернуты на $\pm 5^\circ$. Сигнал триггера первого уровня формируется, если в СМ сработало не менее двух нечетных и не менее двух четных плоскостей. Для каждой плоскости СМ можно получить координаты прохождения частиц с пространственной точностью около 1 см. Точность реконструкции θ для разных пар СМ $\sim 0.3^\circ-0.5^\circ$.

При анализе экспериментальных данных отбирались два типа событий: 1) частицы, прошедшие через два боковых СМ, расположенных с разных сторон водного бассейна (анализировались данные за период с февраля по июнь 2003, серия NAD4), 2) частицы, прошедшие через один из верхних СМ и один из боковых СМ (декабрь 2004 – апрель 2005, серия NAD6). Разным парам СМ соответствуют существенно отличающиеся значения пороговой энергии. Основным критерием отбора являлся критерий "объединения треков" (ОТ), который состоял в том, чтобы два трека, восстановленные в одном событии по данным разных супермодулей, совпадали в пределах конуса с раствором не более 5° . В этом случае треки в отдельных СМ считаются треками одной частицы, а за ее траекторию выбирается прямая, соединяющая середины восстановленных в каждом из СМ сегментов треков.

Из обработки исключались наборы с нестабильной работой одного или нескольких СМ, со сбоями электроники, а также периоды, в которых наблюдались сильные магнитные возмущения (например, форбуш-понижения). Из четырех СМ ДЕКОР-В использовались данные двух СМ: СМ08 и СМ09, поскольку их работа была более продолжительной и более стабильной. В результате общее время регистрации составило 2006 и 1627 часов соответственно. Общая статистика превышает 4 млн. событий.

Для каждого отобранного события рассчитывались значения зенитного и азимутального углов и пороговой энергии (см. главу 2) и событие помещалось в массив $N(\theta, \varphi, E_{\text{мин}})$.

Для оценки числа неверно восстановленных треков в событиях с частицами сопровождения был проведен дополнительный анализ. Он показал, что число событий, в которых реконструкция трека может вызывать сомнения, составляет менее 0.015 % от общего числа событий, т.е. влиянием неверного восстановления треков можно пренебречь.

При регистрации частиц может возникнуть ситуация, когда один или несколько супермодулей окажутся в области мертвого времени электроники. При этом СМ не сработает, и информация о частице будет отсутствовать. Поэтому в знаменатель формулы (1) вводится коэффициент $\epsilon_{\text{СМ}}$, учитывающий эффективность триггирования отдельного СМ. Для супермодулей боковой и верхней части ДЕКОР значения коэффициентов будут разными (за счет разницы в электронике для СМ ДЕКОР-Б сигнал о срабатывании плоскости появляется при срабатывании Y-стрипа, для СМ ДЕКОР-В – при срабатывании X-стрипа). Кроме того, в мае 2004 года для уменьшения мертвого времени СМ ДЕКОР-Б в электронику были внесены изменения (перед контроллером триггера первого уровня добавлены формирователи, уменьшающие длительность импульса от срабатывания плоскости). Поэтому для серий NAD4 и NAD6 коэффициенты $\epsilon_{\text{СМ}}$ для СМ боковой части ДЕКОР будут разными. В электронику СМ ДЕКОР-В изменения не вносились.

Для оценки влияния мертвого времени электроники использовались события, в которых регистрировались широкие атмосферные ливни (ШАЛ). В этом случае, в предположении, что частицы равномерно распределены в пространстве, можно ожидать, что должны сработать все СМ в некоторой группе и в каждом СМ из группы должно сработать большое число стрипов ("большая" загрузка). Если при этом один из СМ группы не сработал, то можно предположить, что он оказался в мертвой временной зоне. Использовался следующий критерий "большой" загрузки в непрерывной цепочке данных, получаемых последовательно с плоскостей "X" и "Y", сработавшие стрипы должны быть распределены не менее чем в 24 разных "восьмерках" стрипов. Это условие должно выполняться не менее чем в пяти плоскостях СМ.

Вероятность несрабатывания i -го СМ определялась по следующей формуле: $w_i = N_{o_{\text{СМ}_i}} / N_{\text{гр}}$, где $N_{\text{гр}}$ – число событий с группой сработавших СМ с "большой" загрузкой, $N_{o_{\text{СМ}_i}}$ – число событий из $N_{\text{гр}}$, в которых i -й СМ не сработал. В результате для СМ ДЕКОР-Б были получены следующие значения $\epsilon_{\text{СМ}} = 0.953 \pm 0.003$ (первый период) и $\epsilon_{\text{СМ}} = 0.993 \pm 0.001$ (второй период), для СМ ДЕКОР-В $\epsilon_{\text{СМ}} = 0.970 \pm 0.001$.

В главе 2 описываются схема расчета пороговой энергии и методика расчета светосилы установки

При определении интегральной интенсивности потока мюонов для любой пары супермодулей необходимо знать пороговую энергию в данном направлении. Для ее расчета создана программа, в которой учитываются точные геометрические размеры здания ЭК НЕВОД. Учтено, что стены здания состоят из кирпича (SiO_2 , плотность кирпича $\rho_{\text{ст}} = 1.8 \text{ г/см}^3$, толщина стен $d_{\text{ст}} = 55 \text{ см}$). Крыша состоит из двух слоев: 1) бетон (плотность $\rho_{\text{бет}} = 2.1 \text{ г/см}^3$, толщина $d_{\text{бет}} = 10 \text{ см}$), 2) керамзит (SiO_2 , плотность $\rho_{\text{кер}} = 0.5 \text{ г/см}^3$, толщина $d_{\text{ксп}} = 25 \text{ см}$). Стены бассейна толщиной 60 см состоят из бетона (плотность $\rho_{\text{бет}} = 2.1 \text{ г/см}^3$). Бассейн до высоты 8.5 м наполнен водой ($\rho_{\text{вод}} = 1 \text{ г/см}^3$).

Пороговая энергия для мюонов, прошедших через выбранную пару СМ, складывается из потерь в бетоне, воде, бетоне (для пар ДЕКОР-Б–ДЕКОР-Б) или в железной крышке бассейна (для пар ДЕКОР-В–ДЕКОР-Б), внешней кирпичной стене и/или в бетонном и в керамзитовом слое крыши

$$T_0 \rightarrow T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow T_3 \rightarrow T_4 \rightarrow T_{\text{мин}}, E_{\text{мин}} = T_{\text{мин}} + m_{\mu} \quad (2)$$

При пересчете энергий используются таблицы пробега энергии из работы D E Groom, N V Mokhov, S.I Striganov (2001)

Критерий объединения треков (ОТ) приводит к увеличению пороговой энергии, т.к. если на вылете из бассейна энергия мюона равна нулю, то вероятность, что он рассеется на угол меньше 5° , очень мала. Поэтому пересчет пороговой энергии начинается с энергии T_0 , выбираемой из условия минимума выражения $\{\varepsilon_{\text{ОТ-1}}\}$

$$\varepsilon_{\text{ОТ}} = \frac{\int_{T_0}^{\infty} (dI_{\mu}(\theta, E)/dE)dT}{\int_0^{\infty} \eta(\theta, \varphi, E_{\text{мин}}, T) (dI_{\mu}(\theta, E)/dE)dT}, \quad (3)$$

где T – кинетическая энергия мюона на вылете из бассейна, $I_{\mu}(\theta, E)$ – спектр мюонов, близкий к реальному (см главу 4), $\eta(\theta, \varphi, E_{\text{мин}}, T)$ – вероятность, что мюон за счет многократного рассеяния рассеется на угол меньше 5° .

Расчитанная зависимость выражения $\{\varepsilon_{\text{ОТ-1}}\}$ от T для "основных" треков для пары СМ01–СМ02 приведена на рис 2. "1" – самый короткий горизонтальный трек, "4" – самый длинный

горизонтальный трек, "3" – трек с минимальным зенитным углом, "6" – самый длинный трек из возможных, "2" и "5" – "промежуточные" треки. Как видно из графика, для пары СМ01-СМ02 значение энергии $T_0 = 240$ МэВ, при этом систематическая неопределенность, вносимая в интенсивность, не превышает 0,3%. Таким же образом значения T_0 и систематической неопределенности были определены для всех пар СМ.

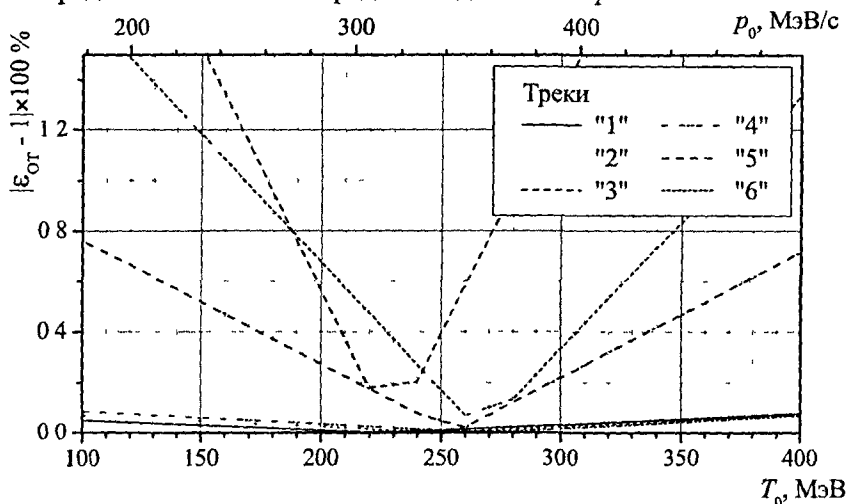


Рис.2. Зависимость выражения $|\epsilon_{от} - 1|$ от кинетической энергии на вылете из бассейна для "основных" треков пары СМ01-СМ02

При обработке экспериментальных данных зенитный и азимутальный углы и пороговая энергия вычисляются для каждого события, которое затем помещается в массив данных $N(\theta, \phi, E_{мин})$ с шагом по зенитному углу $\Delta\theta = 1^\circ$, по азимутальному углу $\Delta\phi = 0,5^\circ$ и по пороговой энергии $\Delta E_{мин} = 250$ МэВ для пар ДЕКОР-Б-ДЕКОР-Б и $\Delta E_{мин} = 450$ МэВ для пар ДЕКОР-В-ДЕКОР-Б.

Программа расчета пороговой энергии мюона в здании ЭК НЕВОД является универсальной и может использоваться не только для получения интегральной интенсивности, но и для других задач, например, для оценки пороговой энергии для альбедных мюонов и мюонов в группах, а также для точного учета зависимости $E_{мин}$ от зенитного и азимутального углов для других установок экспериментального комплекса НЕВОД.

Светосила установки рассчитывалась методом Монте-Карло. Выбранная пара супермодулей заключается в прямоугольный параллелепипед с минимально возможным объемом. Внутри параллелепипеда выбирается плоскость, которая равномерно заполняется точками (x, y, z) . Для каждой точки разыгрываются угол φ (равномерно от φ_{\min} до φ_{\max} – определяются из геометрии пары) и угол θ (равномерно по $\cos\theta$), которые определяют трек мюона.

На первом этапе производится проверка прохождения трека мюона через все плоскости каждого из двух СМ. Далее проверяется условие, регистрируется ли мюон плоскостями СМ. Проверка проводится с учетом объемной структуры СМ (пустоты между камерами и полукameraми, стенки между соседними трубками, отключенные полукameraми, холдеры). Также учитывается условие триггера первого уровня. Кроме того, принимается во внимание, что трек мюона восстанавливается геометрической программой, если сработало не менее пяти плоскостей из восьми.

При моделировании считается, что эффективность регистрации при прохождении частиц через рабочий объем трубок равна 100%. Если в итоге мюон зарегистрирован в обоих СМ, для него производится расчет пороговой энергии по той же схеме, что и для эксперимента, и событие заносится в массив $N_{SQ}(\theta, \varphi, E_{\min})$.

Парциальная светосила рассчитывается по следующей формуле

$$S\Omega(\theta, \varphi, E_{\min}) = \frac{N_{SQ}(\theta, \varphi, E_{\min}) S_0 \Omega \cos\psi_0}{N_0}, \quad (4)$$

где S_0 – площадь плоскости, на которой разыгрываются точки; ψ_0 – угол между нормалью к плоскости S_0 и треком мюона, Ω – полный телесный угол, который равен

$$\Omega = \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \sin\theta d\theta d\varphi, N_0 - \text{общее число разыгранных событий}$$

Для проверки корректности учета структуры СМ при моделировании было проведено сравнение моделированных данных с экспериментальными. Для этого разыгрывался поток мюонов по распределению, близкому к реальному, при пороговой энергии больше 1.7 ГэВ. Для пары СМ09-СМ06 отбирались события с азимутальным углом $267^\circ \leq \varphi \leq 273^\circ$ (именно в этом

диапазоне азимутальных углов для СМ09 начинает проявляться эффект пустот между камерами и полукамерами) Для отобранных треков было построено распределение по координате x в средней геометрической плоскости СМ09 (шаг гистограммы 5 мм) Для пары СМ09-СМ05 отбирались события с азимутальным углом $177^\circ \leq \varphi \leq 183^\circ$ (в этом диапазоне азимутальных углов для СМ09 начинает проявляться эффект холдеров) Для этих треков было построено распределение по координате y в средней геометрической плоскости СМ09 (шаг гистограммы 5 мм). Такие же распределения получены и для экспериментальных данных. Сравнение результатов моделирования и эксперимента для указанных пар супермодулей приведено на рис.3. Результат моделирования полностью воспроизводит экспериментальную картину чередования промежутков в СМ

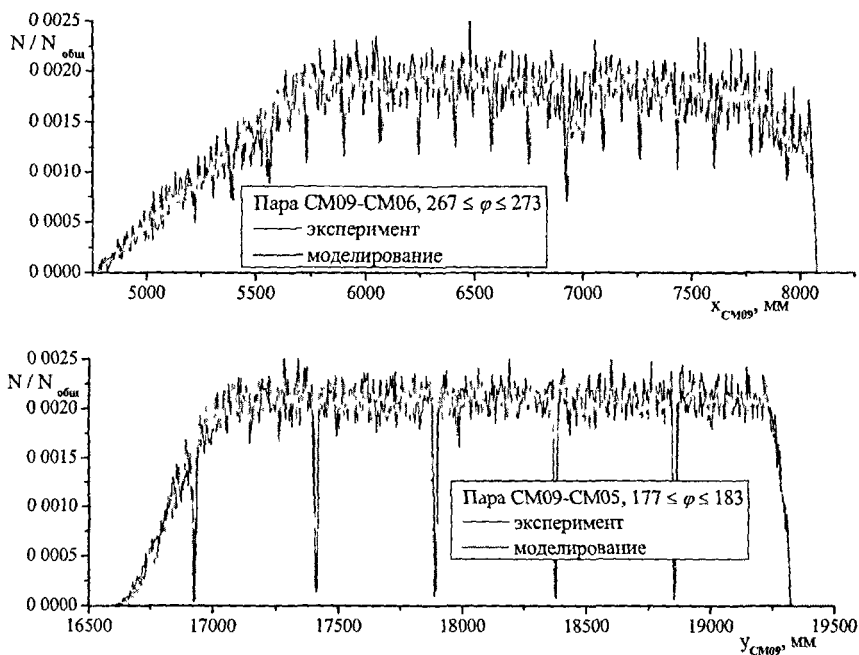


Рис.3. Влияние структуры супермодулей. Сравнение результатов моделирования с экспериментом

В главе 3 приводится полученная интегральная интенсивность, аппроксимационная формула и сравнение полученных результатов с данными других экспериментов.

Разным парам СМ соответствуют разные значения пороговой энергии. Минимальная пороговая энергия составляет 1.5 ГэВ (пара СМ09-СМ05), максимальная равна 7.2 ГэВ (пары СМ06-СМ00, СМ07-СМ00). При обработке экспериментальных данных для каждого события восстанавливался трек мюона, рассчитывались зенитный и азимутальный углы и пороговая энергия, после чего событие помещалось в массив данных $N(\theta, \varphi, E_{\text{мин}})$ с шагом по зенитному углу $\Delta\theta = 1^\circ$, по азимутальному углу $\Delta\varphi = 0.5^\circ$ и по пороговой энергии $\Delta E_{\text{мин}} = 250$ МэВ для пар ДЕКОР-Б-ДЕКОР-Б и $\Delta E_{\text{мин}} = 450$ МэВ для пар ДЕКОР-В-ДЕКОР-Б. Далее по формуле (1) рассчитывались значения интегральной интенсивности для разных зенитных углов и пороговых энергий. Для пар ДЕКОР-В-ДЕКОР-Б появляется дополнительный множитель, равный 64 (учет пересчета триггера № 9 с коэффициентом 1/64). Было показано, что для фиксированных $E_{\text{мин}}$ и θ зависимости интегральной интенсивности от азимутального угла не наблюдается, поэтому после первого расчета проводилось усреднение по азимутальному углу.

В результате получена интегральная интенсивность мюонов для области зенитных углов $20^\circ \leq \theta \leq 89^\circ$ и пороговых энергий от 1.5 до 7.2 ГэВ. Зависимость интенсивности от зенитного угла для нескольких значений пороговой энергии приведена на рис. 4. Видно, что полученные данные хорошо согласуются друг с другом: кривые с большей пороговой энергией идут ниже, интенсивности для пороговых энергий 1.7 ГэВ и 3.3 ГэВ, полученные по данным разных пар СМ, "продолжают" друг друга.

Для решения различных практических задач необходимо знать зависимость интенсивности от зенитного угла и пороговой энергии в достаточно большой области указанных параметров. В результате анализа для аппроксимации совокупности полученных данных получена простая формула

$$I_{\text{аппр}}(\theta, E_{\text{мин}}) = \frac{C_I}{E_I^\gamma} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma+1} \frac{E_{\text{кр}}}{E_I} \ln\left(\frac{h_0}{h_1 \cos\theta^*}\right)\right). \quad (5)$$

Множитель перед экспонентой отражает форму интегрального энергетического спектра мюонов в верхних слоях атмосферы, а экспоненциальный фактор учитывает распад мюонов

C_1 – нормировочный коэффициент, $E_1 = E_{\text{мин}} + a \cdot (h_0 / \cos \theta^* - h_1)$ – энергия мюона на уровне генерации (ГэВ), a – эффективные удельные потери энергии, $(h_0 / \cos \theta^* - h_1)$ – путь, пройденный мюоном до установки, $h_0 = 1018 \text{ г/см}^2$ – полная толщина атмосферы (с учетом высоты установки над уровнем моря), $h_1 = 100 \text{ г см}^2$ – эффективная глубина генерации, $E_{\text{кр}} = z_0 m_\mu c^2 / (c \tau_0 \cos \theta^*)$ – эффективная критическая энергия мюонов для их распада в атмосфере, z_0 – эффективная длина, на которой плотность атмосферы изменяется в e раз, c – скорость света, τ_0 – время жизни мюона в собственной системе координат, $m_\mu c^2$ – масса мюона (ГэВ), $\cos \theta^* = (\cos^\alpha \theta + \Delta)^{1/\alpha}$ – аппроксимация влияния сферичности атмосферы. В результате фитирования экспериментальных данных получены следующие значения параметров $C_1 = 0.087 \pm 0.006$, $a = 2.38 \pm 0.14 \text{ МэВ/(г/см}^2)$, $\gamma = 1.91 \pm 0.01$, $z_0 = 6.56 \pm 0.11 \text{ км}$, $\Delta = 0.0560 \pm 0.0002$ и $\alpha = 1.49 \pm 0.02$

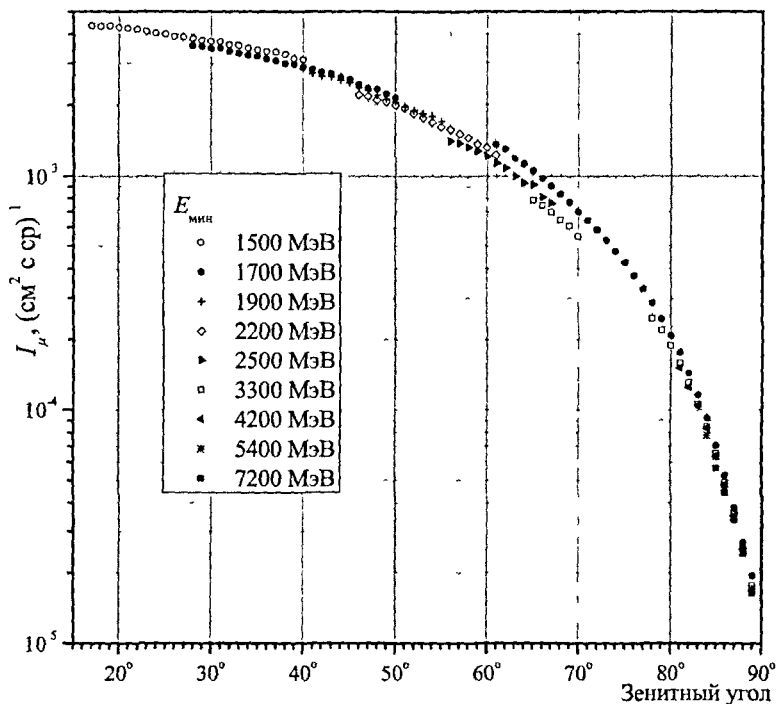


Рис.4. Зависимость интегральной интенсивности от зенитного угла для нескольких значений пороговой энергии.

На рис.5 символами представлена зависимость полученной интегральной интенсивности от зенитного угла для нескольких значений пороговой энергии и линиями показан фит по формуле (5). Для удобства представления данных интенсивности для разных пороговых энергий домножены на степени 10. Как видно из графика, расчет по аппроксимационной формуле очень хорошо описывает экспериментальные данные.

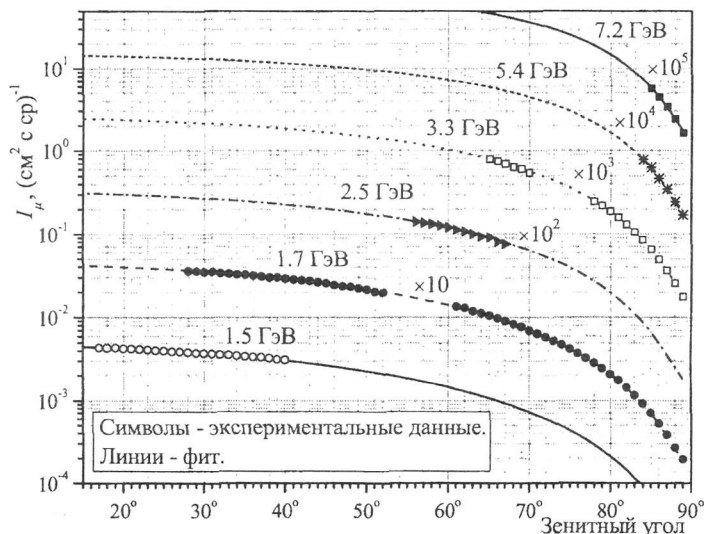


Рис.5. Зависимость интегральной интенсивности мюонов от θ для нескольких значений $E_{\text{мин}}$. Символы — экспериментальные данные ДЕКОР, линии — аппроксимация по формуле (5).

Зависимость интегральной интенсивности от зенитного угла, рассчитанная для пороговых энергий 1, 0.7 и 0.3 ГэВ, и экспериментальные данные предыдущих измерений показаны на рис.6. Сравнение рассчитанных значений с результатами работ Gettert, Judge, Moroney, Crookes, Flint, Karmakar и Bhattacharyya показывают хорошее согласие. В работах Wilson и Jakeman интенсивность несколько выше измеренной в работе Gettert и рассчитанной по формуле (5). Интегральная интенсивность для пороговой энергии 1 ГэВ, полученная в работе Tsuji, уменьшается с ростом зенитного угла медленнее, чем следует из работ Gettert и Bhattacharyya и расчета по формуле (5), но для углов менее 72° согласие достаточно хорошее.

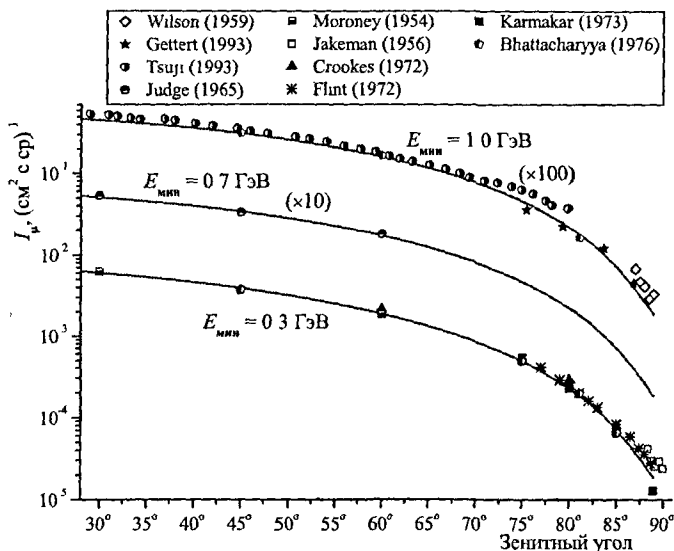


Рис. 6. Зависимость интегральной интенсивности от зенитного угла для пороговых энергий 0.3, 0.7 и 1 ГэВ. Символами показаны экспериментальные данные, линиями – фит по формуле (5)

Различие между данными может быть вызвано следующими причинами. Установки расположены на нескольких разных высотах (от нескольких метров до 170 м над уровнем моря) и на разных географических широтах. Также в предыдущих экспериментах интенсивность для разных зенитных углов и пороговых энергий измерялась в разные периоды времени, следовательно, при разных давлениях и температурах. Поэтому разброс может быть вызван барометрическим и температурным эффектами. Данные установки ДЕКОР получены за достаточно продолжительный период времени, поэтому можно считать, что они усредняются по давлению и влияние барометрического эффекта на результат мало. Однако температурный эффект не усредняется, поскольку обрабатываются периоды по полгода, начиная с февраля и декабря, в них не входят два летних месяца (июль и август, установка в это время останавливается для проведения профилактических работ). Строго говоря, нормировочный коэффициент C_1 в формуле (5) должен зависеть от времени года, подчиняясь некоторому квазипериодическому закону.

В главе 4 дано определение дифференциальных температурных коэффициентов (ДТК), а также описание расчета дифференциального энергетического спектра мюонов полуаналитическим методом и методики расчета ДТК. Приведено сравнение рассчитанного дифференциального спектра с экспериментальными данными и сравнение рассчитанных ДТК с данными других работ.

Пусть $N(E_{\text{мин}}, X, \theta)$ – интегральный поток мюонов в точке наблюдения на глубине X (в атм) для зенитного угла θ и пороговой энергии $E_{\text{мин}}$. При изменении высотного хода температуры на $\Delta T(h)$ в слое dh (h – глубина в атм) поток мюонов изменится на $\Delta N(E_{\text{мин}}, X, \theta)$ и относительное отклонение можно записать в следующем виде:

$$\Delta N(E_{\text{мин}}, X, \theta) / N(E_{\text{мин}}, X, \theta) \cdot 100\% = \int_0^X W_T(E_{\text{мин}}, X, h, \theta) \Delta T(h) dh \quad (6)$$

где функция $W_T(E_{\text{мин}}, X, h, \theta)$ и есть ДТК, которые показывают на сколько процентов изменится поток мюонов в точке наблюдения при изменении температуры на глубине h в слое dh на 1°K .

ДТК можно рассчитать полуаналитическим методом на основе формул для расчета спектра мюонов. Дифференциальный спектр мюонов на глубине наблюдения X рассчитывается с учетом функций генерации адронов и мюонов и прохождения мюонов через атмосферу

$$P^{\eta\mu}(E, X, \theta) = \int_0^X dz \int_0^z dz' \int_0^{(\eta^2 / \mu^2)z} dE_\eta F(E, X, \theta, z, z', E_\eta), \quad (7)$$

При расчете использовались следующие значения параметров $L_p = 110 \text{ г/см}^2$ – пробег поглощения нуклонов ПКИ в воздухе, $\gamma = 2.7$ – показатель интегрального энергетического спектра мезонов, пробеги взаимодействия пионов и каонов $l_\pi = 120 \text{ г/см}^2$ и $l_K = 150 \text{ г/см}^2$.

Интегральный поток мюонов $N(E_{\text{мин}}, X, \theta)$ можно получить, проинтегрировав дифференциальный спектр по энергии

$$N(E_{\text{мин}}, X, \theta) = \int_{E_{\text{мин}}}^\infty P^{\eta\mu}(E, X, \theta) dE \quad (8)$$

В данной работе использовалась стационарная "шестислойная" модель атмосферы. Поверхность Земли и сама атмосфера считались сферическими. В модели за исходные

параметры приняты значения температуры воздуха $T(H)$ в зависимости от высоты наблюдения над уровнем моря H в км и молекулярная масса сухого воздуха $M = 0.028966$ кг/моль. Остальные параметры модели получены из предположения о справедливости в атмосфере уравнения гидростатики.

Для того чтобы получить выражение для $\Delta N(E_{\text{мин}}, X, \theta)$ соотношение (8) было проварьировано по температуре при постоянном давлении. Далее формулы для расчета температурного эффекта были разбиты на две составляющие (т.н. мезонный и мюонный эффекты):

$$W_T(E_{\text{мин}}, X, h, \theta) = W_T^{\mu}(E_{\text{мин}}, X, h, \theta) + W_T^{\pi}(E_{\text{мин}}, X, h, \theta). \quad (9)$$

Знак мезонного эффекта W_T^{π} является положительным, знак мюонного эффекта W_T^{μ} отрицателен. Соотношение эффектов по абсолютной величине зависит от $E_{\text{мин}}$. При малых пороговых энергиях мезонный эффект по абсолютной величине меньше мюонного и знак суммарного эффекта W_T отрицателен. При больших пороговых энергиях мюонный эффект "вырождается" и знак суммарного эффекта W_T становится положительным.

Результаты расчета W_T для $E_{\text{мин}} = 0.4$ ГэВ и шести значений зенитного угла приведены на рис.7.

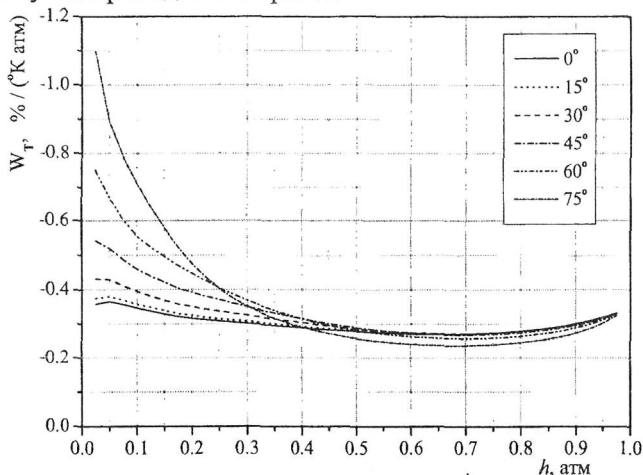


Рис. 7. Суммарные ДТК, рассчитанные для $E_{\text{мин}} = 0.4$ ГэВ и шести значений зенитного угла.

Наиболее известными работами, в которых вычислялись температурные коэффициенты W_T , являются работы К Маеда и Л И Дормана и В Г Янке

В работе К Маеда при расчете использовалась эмпирическая формула спектра генерации мюонов на глубине атмосферы z $P^{\mu}(p, z) = A/(a' + p)^{3.38} \exp(-z/L_{\eta})$, где p – импульс мюона, A и a' – константы, $L_{\eta} = 120 \text{ г/см}^2$ – средний пробег первичных частиц до поглощения. Расчеты были проведены для "двухслойной" сферической атмосферы, учитывалась зависимость потерь от энергии. В этой работе приведены мюонные W_T^{μ} и мезонные W_T^{π} дифференциальные коэффициенты, рассчитанные для $\theta = 0^\circ$ и шести значений пороговой энергии: 0.5, 2.2, 4.5, 10, 21, и 43 ГэВ. Для сопоставления с данными К Маеда были проведены расчеты для этих пороговых энергий. Результаты показывают хорошее качественное согласие.

ДТК, полученные в работе Л И Дормана и В Г Янке для $E_{\text{мин}} = 0.4 \text{ ГэВ}$ и четырех значений зенитного угла приведены на рис.8. ДТК, полученные в этой работе для больших зенитных углов, качественно согласуются с результатами настоящей работы (рис 7). Но зависимость W_T от h для зенитного угла 0° довольно сильно отличается. Конечно, напрямую сравнивать ДТК, полученные в настоящей работе, с результатами указанной работы не совсем корректно, поскольку в этой работе использовались другие значения параметров ($\gamma = 2.5$, $L_p = 120 \text{ г/см}^2$, $L_{\pi} = 60 \text{ г/см}^2$), не учитывался вклад каонов в поток мюонов, потери мюонов считались постоянными ($2 \text{ МэВ} / \text{г/см}^2$), использовалась упрощенная модель атмосферы. Для того чтобы понять, не вызвано ли такое расхождение в поведении W_T использованными приближениями и значениями параметров, был произведен дополнительный расчет. В используемую в настоящей работе модель расчета были внесены те же приближения и те же значения параметров, которые использовались в работе Л И Дормана и В Г Янке, отключен вклад каонов. Результаты дополнительного расчета изображены на рис 9. Из сравнения рис 8 и рис 9 видно, что расхождение при зенитном угле 0° сохраняется.

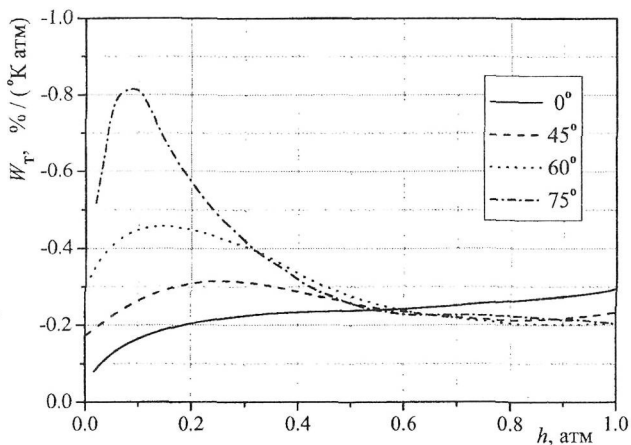


Рис.8. Дифференциальные температурные коэффициенты, полученные в работе Л.И. Дормана и В.Г. Янке для $E_{\text{мин}} = 0.4$ ГэВ.

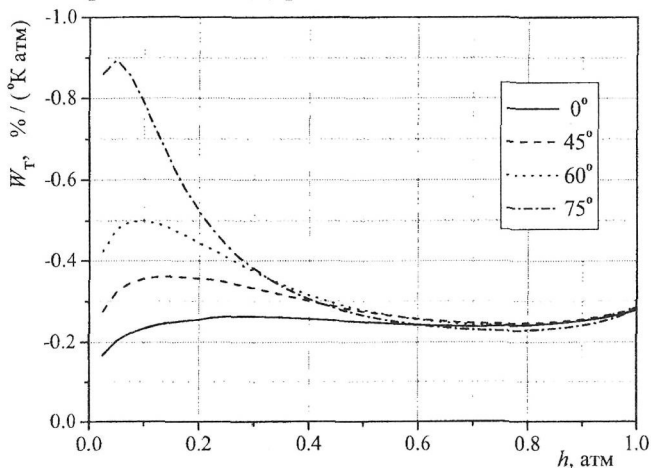


Рис.9. ДТК, рассчитанные для $E_{\text{мин}} = 0.4$ ГэВ с использованием приближений работы Л.И. Дормана и В.Г. Янке.

Из сравнения представленных выше графиков видно, что более точный расчет сильно изменяет зависимость W_T от h и от $E_{\text{мин}}$. Использование ДТК, рассчитанных в предыдущих работах, для учета метеорологических эффектов может приводить к серьезным погрешностям при исследовании вариаций внеатмосферного происхождения.

В **Заключении** диссертации перечислены основные результаты работы

1. По экспериментальным данным
 - обработаны экспериментальные данные серии NAD4 (2003 г) для всех пар СМ ДЕКОР-Б–ДЕКОР-Б (более 2 млн событий) и данные серии NAD6 (2004-2005 гг) для всех пар СМ ДЕКОР-В–ДЕКОР-Б (более 2 млн событий),
 - получена оценка влияния мертвого времени электроники СМ ДЕКОР.
2. По обработке и анализу
 - разработана методика расчета пороговой энергии мюонов,
 - рассчитана светосила для всех пар СМ ДЕКОР-Б–ДЕКОР-Б и ДЕКОР-Б–ДЕКОР-В,
 - получена интегральная интенсивность потока мюонов для зенитных углов 20° - 90° и пороговых энергий 1–7 ГэВ,
 - получена простая аппроксимационная формула зависимости интегральной интенсивности потока мюонов от зенитного угла и пороговой энергии и определены ее параметры,
 - рассчитаны дифференциальные температурные коэффициенты для мюонов (для нескольких значений пороговой энергии и зенитных углов в диапазоне от 0° до 75°)
3. По программному обеспечению
 - программа расчета пороговой энергии мюонов для любой пары СМ для произвольных зенитных и азимутальных углов
 - программа расчета светосилы для любой пары СМ,
 - программа полуаналитического расчета потока мюонов для разных пороговых энергий, зенитных углов и высот над уровнем моря,
 - программа расчета дифференциальных температурных коэффициентов для мюонов космических лучей для разных пороговых энергий и зенитных углов

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. А Н Дмитриева, *Измерения абсолютной интегральной интенсивности потока мюонов при больших зенитных углах* // Баксанская молодежная школа экспериментальной и теоретической физики 2004, Сб трудов, Нальчик, КБГУ, 2005, Т 1, С.16-23

- 2 Сотрудничество ДЕКОР, представлено А Н.Дмитриевой,
*Измерения интегральной интенсивности мюонов при больших
зенитных углах // Научная сессия МИФИ-2005, М МИФИ,
Сб. научных трудов, 2005, Т 7, С 14-15*
- 3 A N Dmitrieva, D V Chernov, R P Kokoulin, K G Kompaniets,
G Mannocchi, A A Petrukhin, O Saavedra, V V.Shutenko,
D A Timashkov, G Trinchero, I.I.Yashin, *Measurements of integral
muon intensity at large zenith angles // Proc 29-th ICRC, Pune,
India, 2005, V 6, P.73-76*
- 4 А.Н Дмитриева, Р П Кокоулин, К Г Компаниец, А А Петрухин,
О Сааведра, Д А Тимашков, Д В.Чернов, В В Шутенко,
И И Яшин, *Измерение интегральной интенсивности мюонов
при больших зенитных углах // Ядерная физика, 2006, Т 69,
№ 5, С 892-898*
- 5 А Н Дмитриева, Р П Кокоулин, К Г.Компаниец, Дж.Маннокки,
А А Петрухин, О Сааведра, Д А.Тимашков, Дж Тринкеры,
Д В.Чернов, В В Шутенко, И И Яшин, *Измерения интегральной
интенсивности мюонов при больших зенитных углах //
Изв РАН, Серия физич , 2007, Т.71, № 4, С 569-572*
- 6 A N Dmitrieva, D V. Chernov, R.P Kokoulin, et al., *Measurements
of integral muon intensity at large zenith angles //
arXiv hep-ex/0611051.*
- 7 A N Dmitrieva, D V Chernov, R P Kokoulin, K G.Kompaniets,
G Mannocchi, A.A Petrukhin, O Saavedra, V V Shutenko,
D A Timashkov, G Trinchero, I I Yashin, *Measurements of absolute
muon intensity at zenith angles from 20° to 90° // Proc 30-th ICRC,
Mérida, México, 2007, Section HE 2 1, paper ID 202.*
- 8 А Н Дмитриева, Р П Кокоулин, А А Петрухин,
Д А Тимашков *Расчет дифференциальных температурных
коэффициентов для мюонов космических лучей // Научная
сессия МИФИ-2008, М. МИФИ, Сб научных трудов, 2008,
Т 9, С 192-194*

Подписано в печать

Заказ

Тираж

Типография МИФИ, Каширское шоссе, 31