

Учреждение Российской академии наук
Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН

На правах рукописи

Чубенко Александр Поликарпович

**Спектр множественности нейтронов в событиях,
наблюдаемых на подземном нейтронном мониторе
Тянь-Шаньской высокогорной станции (3340 м над уровнем моря)**

Специальность 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук Рябов В.А.,
Учреждение Российской академии наук
Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, г. Москва

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Свешникова Л. Г.,
НИИ ядерной физики им. Д.В.Скобельцына МГУ, г. Москва

доктор физико-математических наук Стожков Ю. И.,
Учреждение Российской академии наук
Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, г. Москва

Ведущая организация:

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва.

Защита состоится 18 октября 2010 г. в 12 часов на заседании
диссертационного совета № Д 002.023.04 при Учреждении Российской
академии наук Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН по адресу:
119991, г. Москва, Ленинский проспект, 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской
академии наук Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Серов А.В.

ВВЕДЕНИЕ

Общая характеристика работы

Предмет диссертации представляет собой продолжение исследований адронных взаимодействий высокой энергии в космических лучах, которые в течение последних десятилетий проводятся на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции (ТШВНС, 3340 м над уровнем моря) с применением методики нейтронного монитора.

Работа состоит из двух частей, первая из которых носит методический характер. В этой части проводится экспериментальное исследование нейтронного монитора особой конструкции, отличающегося от стандартного нейтронного супермонитора НМ64 по своим размерам, количеству информационных каналов и материалу внутреннего замедлителя. Путем сравнения спектра множественности нейтронов, регистрируемых на нестандартном мониторе, с аналогичным спектром Тянь-Шаньского супермонитора 18НМ64 и энергетическим спектром адронов космических лучей, измеренным ранее на ТШВНС с помощью ионизационного калориметра, для мониторов обеих конструкций выводятся формулы, позволяющие оценивать энергию первичных адронов E_n по количеству зарегистрированных импульсов от нейтронных детекторов монитора М. Во второй части работы эти соотношения применяются к экспериментальному материалу, полученному на нестандартном мониторе, который работал в подземном помещении Тянь-Шаньской станции, на глубине 2000 г/см^2 ниже ее поверхности. В результате этих исследований было получено указание на возможность генерации нейтронных событий под землей во взаимодействии некоторой проникающей компоненты космических лучей, которая по своей природе отлична как от мюонов, так и от обычных адронов.

Актуальность работы

Нейтронные измерения широко используются при исследовании космических лучей. Существует мировая сеть станций для исследования вариаций интенсивности космического излучения, которые определяют наши знания по целому направлению астрофизики космических лучей: солнечно-земные связи, влияние галактического излучения и солнечных вспышек на состояние магнитосферы Земли и солнечной системы в целом («космической погоды»), проблемы радиационной безопасности в ближнем и дальнем космосе и др. Станции расположены по всему земному шару на различных широтах и ведут непрерывные измерения интенсивности потока адронов (в основном нейтронов) на различных глубинах атмосферы с помощью нейтронных мониторов. Детекторы, основанные на том же принципе работы, применяются

и при исследовании свойств широких атмосферных ливней (ШАЛ) от первичных частиц с энергией выше 100 ТэВ. В этом случае нейтронные мониторы включаются в состав ливневых установок и выполняют функцию детекторов адронной компоненты ШАЛ. Аналогичные установки в последнее время используются и в ускорительных экспериментах (ALICE), где они служат для регистрации адронов с низким энергетическим порогом. Существуют проекты орбитальных обсерваторий космических лучей (ИНКА и др.), в которых роль адронного детектора отводится нейтронному монитору или комбинированным устройствам с применением нейтронных детекторов. Обширная область применения нейтронных мониторов делает актуальным выполнение методических работ, связанных с исследованием физики нейтронного монитора, построением моделей для расчета первичного адронного взаимодействия и последующих процессов термализации и диффузии испарительных нейтронов, сопоставлением данных, полученных на различных установках. Методическая часть настоящей диссертации, которая связана с вопросом о взаимной калибровке нейтронных мониторов различного типа, соответствует задачам этого круга.

В связи с обнаружившимися в течение последнего десятилетия фактами, говорящими о наличии в окружающем нас мире темной энергии и темной материи и их подавляющем преобладании над известным современной физике веществом, в литературе активно обсуждаются вопросы о возможном существовании частиц-компонентов темной материи и частиц-переносчиков не описываемых Стандартной Моделью взаимодействий. В частности, большое внимание уделяется проблемам возможного существования массивных, слабо взаимодействующих частиц - WIMP'ов, а также частиц странной материи - странглетов, которые должны проявлять себя как слабо взаимодействующие объекты с аномально малым отношением заряда к массе. В свете этих обсуждений, представленные в данной работе экспериментальные факты, говорящие о немюонной природе наблюдаемых на Тянь-Шаньском подземном мониторе нейтронных событий представляют собой особый интерес.

Цель работы

Целью данной работы являются: экспериментальное исследование характеристик нейтронного монитора нестандартной конструкции, предложенного к использованию в намеченной программе развития нейтронных исследований на ТШВНС; вывод калибровочных зависимостей, связывающих множественность зарегистрированных на мониторе нейтронных сигналов с энергией первичного адронного взаимодействия для Тянь-Шаньского нейтронного супермонитора 18НМ64 и для монитора нестандартной конструкции; использование этих данных при анализе результатов эксперимента по регистрации нейтронных событий в подземном помещении Тянь-Шаньской высокогорной станции.

Научная новизна работы

Новизна работы состоит в следующем: предложена новая конструкция нейтронного монитора, пригодного для использования в качестве детектора адронной компоненты ШАЛ, и проведено экспериментальное исследование его характеристик; как для стандартного нейтронного супермонитора НМ64, так и для нейтронного монитора новой конструкции впервые получены калибровочные соотношения, которые позволяют связать множественность зарегистрированных нейтронных сигналов с энергией первичного адронного взаимодействия в обеих установках; впервые в мире поставлен эксперимент по регистрации событий на нейтронном мониторе, располагающемся на высоте гор в подземном помещении, и получен банк экспериментальных данных; при обработке событий экспериментального банка получено указание на немюонную природу частиц-генераторов нейтронных событий на подземном мониторе.

Практическое значение работы

Полученные при выполнении настоящей работы калибровочные зависимости могут применяться в анализе глобальных вариаций интенсивности космического излучения и имеют определенную ценность для проблем, связанных с исследованием и прогнозом состояния радиационной обстановки в ближнем и дальнем космосе. Поскольку основной вклад в радиационную обстановку околоземного пространства вносят солнечные и галактические космические лучи низкой энергии, с которыми связаны события малой кратности в нейтронных мониторах, при таком анализе должна оказаться ценной описанная в данной работе методика коррекции экспериментально измеренных спектров множественности нейтронов и восстановления по ним истинного энергетического спектра ядерно-активных частиц в области низких энергий.

Разработанная в ходе решения задачи об энергетической калибровке монитора методика построения моделей для расчета отклика нейтронных детекторов с опорой на экспериментальные измерения функции генерации испарительных нейтронов может применяться при разработке новых проектов измерительных установок, предназначенных для проведения исследований по физике космических лучей. В частности, апробированные при выполнении данной работы модели взаимодействия адронов высокой энергии с веществом монитора и процессов последующей термализации и диффузии испарительных нейтронов использовались в разработке проекта орбитального ионизационно-нейтронного калориметра ИНКА.

Полученные при анализе измерений на подземном нейтронном мониторе указания на существование в космических лучах проникающей, слабо

взаимодействующей компоненты мюонной природы, способной к генерации значительного числа нейтронов при взаимодействии со свинцовой мишенью, могут оказаться представляющими интерес для будущего развития технологий в области ядерной и термоядерной энергетики.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработка и применение на практике методики коррекции экспериментально измеренного спектра кратности событий, регистрируемых на нейтронном мониторе, и восстановления по этим данным истинного энергетического спектра адронной компоненты космического излучения в области низких энергий.

2. Феноменологические характеристики нейтронных событий, наблюдаемых на подземном нейтронном мониторе ТШВНС, оценка эффективности регистрации испарительных нейтронов в супермониторе.

3. Результаты экспериментально измеренных спектров множественности и временных распределений нейтронных сигналов на Тянь-Шаньском нейтронном мониторе 18НМ64, на нейтронном мониторе новой конструкции и на подземном мониторе, а также основанные на этом материале калибровочные зависимости, позволяющие оценивать энерговыделение в первичном взаимодействии по сигналам от этих установок.

4. Результаты измерения фона тепловых нейтронов в подземном помещении ТШВНС.

5. Анализ спектра множественности нейтронов, зарегистрированных на подземном мониторе в предположении, что нейтронные события под землей вызываются мюонами космических лучей. Вывод о возможной мюонной природе частиц, ответственных за генерацию событий на подземном нейтронном мониторе.

Вклад автора

Автор принимал участие на всех этапах проведения эксперимента:

- в создании аппаратного комплекса;
- в наладке и калибровке детекторов;
- в проведении измерений, начиная с 1999 г. и до настоящего момента;
- в разработке программного обеспечения для системы сбора данных со всех детекторов установки;
- в создании банка экспериментальных данных;
- в обработке и анализе данных в соответствии с поставленной задачей.

Анализ данных по выделению событий выполнен непосредственно автором.

Апробация работы

Представленные в диссертации результаты докладывались на научных семинарах различных организаций: ФИАН, ИЗМИРАН, Институт Ионосферы, ФТИ; а также на международных и всероссийских конференциях по космическим лучам: Калгари (Канада, 1993), Солт-Лейк-Сити (США, 1999), Москва (Россия, 2000, 2002 и 2004), Гамбург (Германия, 2001), Тсукуба (Япония, 2003), Алматы (Казахстан, 2006), Мерида (Мексика, 2007), Санкт-Петербург (Россия, 2008).

Публикации

По представленным в диссертации материалам опубликовано 25 научных статей в журналах: Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Nuclear Physics B (Proc. Suppl.), Доклады Академии Наук, Журнал технической физики, Краткие сообщения по физике ФИАН, Известия РАН, сер. физическая, а также в материалах конференции. Полный перечень работ автора диссертации составляет 120 печатных изданий.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех разделов и заключения, содержит в себе 91 страницу текста, включая 35 рисунков и 143 ссылки на используемые источники.

Содержание работы

Во введении диссертации обосновывается актуальность работы, определяются цель и задачи работы, сформулированы результаты, отражающие научную новизну и практическую значимость работы, перечислены основные положения, которые автор выносит на защиту, излагается объем и структура диссертации.

В первом разделе рассматриваются вопросы современных исследований, связанных с применением нейтронных мониторов и родственных им установок в качестве детекторов адронной компоненты в физике космических лучей. Отмечается, что методики, основанные на использовании нейтронных детекторов, находят применение для решения широкого круга разнообразных задач, начиная от мониторинга интенсивности солнечных и галактических космических лучей и заканчивая изучением свойств адронных взаимодействий высоких и сверхвысоких энергий, как на наземных установках, так и в приборах, которые предназначены для размещения на стратосферных аэростатах и в орбитальных лабораториях. Нейтронные методики находят себе также широкое применение в современных ускорительных экспериментах.

Использование нейтронного монитора для изучения адронов высокой энергии имеет ряд преимуществ перед другими методами регистрации адронных взаимодействий. Особенностью методики нейтронного монитора являются низкий, менее 1 ГэВ, энергетический порог регистрации адронов и широкий динамический диапазон измеряемых энерговыделений. Последнее обстоятельство оказывается наиболее важным при проведении исследований в физике космических лучей, особенно при регистрации широких атмосферных ливней, для которых характерен широкий диапазон интенсивности измеряемых сигналов ($10^5 - 10^6$). Важной особенностью нейтронных детекторов является большое, в 30 – 40 раз, различие в эффективности их регистрации по отношению к ядерно-активным частицам и электронно-фотонной компоненте космических лучей, позволяющее реализовать эффективное выделение адронных сигналов при интенсивном фоне гамма-квантов и заряженных частиц, что особенно важно в условиях космических экспериментов [4, 9, 11, 13, 16 – 21, 23 – 25].

Находящийся на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции, на высоте 3340 м над уровнем моря стандартный нейтронный супермонитор 18НМ64 в течение двух десятилетий систематически использовался для регистрации адронов космического излучения высокой энергии. Для анализа результатов этих экспериментов и их сопоставления с данными других работ потребовалось знание абсолютного энерговыделения адронной компоненты ШАЛ, которое связано с кратностью M нейтронных сигналов, зарегистрированных детекторами монитора после прохождения ливня. Решению этой проблемы посвящён один из разделов данной диссертации.

Подготовка на Тянь-Шаньской станции широкомасштабных проектов, связанных с использованием нейтронного монитора для регистрации адронной компоненты космических лучей, обусловила проведение ряда методических работ по изучению самого нейтронного монитора, характеристик вызываемых в нем энергичными адронами ядерных взаимодействий и по разработке нейтронных детекторов нового типа [5, 10]. Одной из таких работ стало создание экспериментального нейтронного монитора в подземном помещении ТШВНС, под слоем поглотителя (грунта) толщиной 2000 г/см^2 . В первую очередь, данный монитор был предназначен для изучения характеристик новых материалов, которые применялись в качестве среды для замедления и диффузии нейтронов, и исследования влияния его нестандартной (по сравнению с супермонитором НМ64) конструкции на процесс регистрации испарительных нейтронов. В ходе измерений выяснилось, что интенсивность событий в подземном мониторе только в 500 – 600 раз ниже, чем на Тянь-Шаньском супермониторе 18НМ64, и в 3 – 4 раза превышает ожидаемую интенсивность событий, которые могли бы генерироваться за счёт тормозного излучения и фотоядерного взаимодействия мюонов [2, 3]. Исследование наблюдаемых на подземном мониторе нейтронных событий составляет предмет настоящей работы.

Второй раздел диссертации содержит описание комплекса нейтронных детекторов Тянь-Шаньской высокогорной станции, которые использовались при выполнении настоящей работы. Этот комплекс включает в себя: стандартный нейтронный супермонитор типа 18НМ64, состоящий из трёх секций А, В и С, каждая из которых содержит по шесть нейтронных счётчиков СНМ15 [6, 8, 22]; экспериментальный монитор нестандартной конструкции (секцию Е) на девяти счётчиках СНМ15, которая находилась на поверхности ТШВНС рядом с супермонитором 18НМ64; две секции монитора А и В [2, 3], аналогичные по своему устройству секции Е, установленные в подземном помещении Тянь-Шаньской станции под слоем скального грунта, общее количество вещества в котором эквивалентно поглотителю толщиной 2000 г/см^2 (часть статистики на подземном мониторе была получена также с использованием его третьей секции, С, имеющей такое же внутреннее устройство, как и первые две, но содержащей семь нейтронных счётчиков).

Внутреннее устройство секции нейтронного супермонитора 18НМ64 показано на рисунке 1. Супермонитор представляет собой трёхслойную конструкцию, в которой нейтронные детекторы - чувствительные к тепловым нейтронам пропорциональные счётчики СНМ15 - окружены последовательно чередующимися слоями лёгкого (водородсодержащего), тяжёлого и снова лёгкого вещества. В качестве замедлителя в супермониторе НМ64 используются тонкостенные полиэтиленовые трубы с толщиной стенки 10мм, непосредственно внутрь которых вставляются нейтронные счётчики. Тяжёлое вещество, в качестве которого в супермониторе НМ64 используется свинец служит мишенью-поглотителем, в которой проникающие извне внутрь монитора энергичные адроны космических лучей вызывают ядерные расщепления. Рождаемые в этих расщеплениях испарительные нейтроны, которые изначально имеют энергию порядка нескольких МэВ, теряют эту энергию вплоть до тепловых значений $\sim 10^{-2} \text{ эВ}$) при своей диффузии через окружающий счётчики СНМ15 замедлитель.

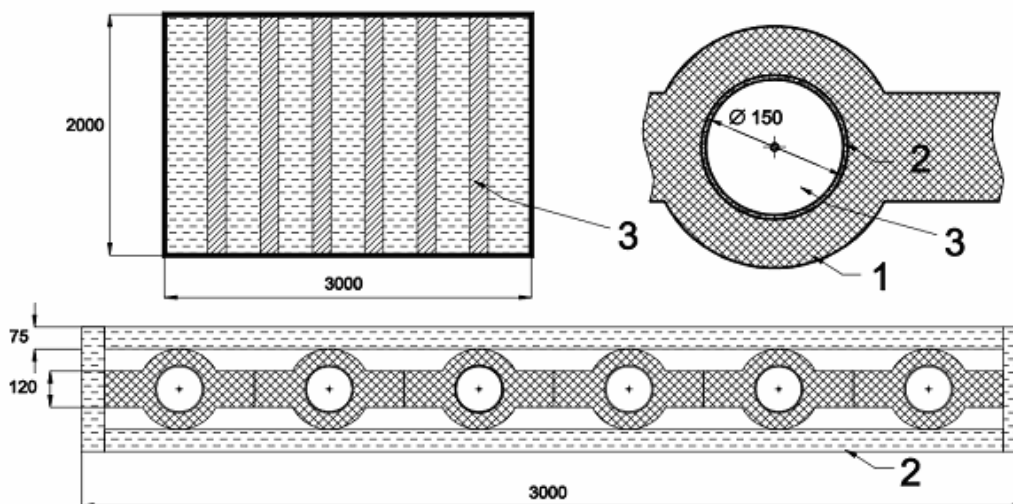


Рис. 1. Внутреннее устройство секции стандартного нейтронного супермонитора НМ64: 1 – свинец, 2 – полиэтилен, 3 – нейтронный счётчик СНМ15. Размеры указаны в миллиметрах.

Замедление испарительных нейтронов при диффузии происходит в результате упругих столкновений с ядрами водорода и углерода, в больших количествах находящихся внутри полиэтилена. В результате замедления испарительные нейтроны от ядерных расщеплений оказываются способными к регистрации нейтронными счётчиками супермонитора, которая происходит благодаря ядерной реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$: обогащённый изотоп ^{10}B газ BF_3 введён в состав наполнения счётчиков СНМ15. Внешний слой лёгкого вещества-замедлителя, полностью закрывающий всю установку снаружи, наряду с замедлением рождаемых внутри монитора нейтронов, служит отражателем и защитой внутренней части монитора от внешнего фона тепловых нейтронов, который постоянно существует в окружающей монитор среде.

Следует отметить, что с процессом регистрации тепловых нейтронов счётчиками СНМ15 конкурируют выход нейтронов наружу через внешние стенки монитора при их диффузии и поглощение тепловых нейтронов при их радиационных захватах ядрами замедлителя. Оба эти процесса, влияние которых сильно зависит от геометрии установки (размеров и конфигурации монитора в целом и отдельных его составляющих), представляют собой потери образованных в ядерных взаимодействиях испарительных нейтронов, снижающие эффективность их регистрации и, соответственно, повышающие энергетический порог регистрации монитором адронов космического излучения. Влияние потерь за счёт утечки нейтронов наружу несколько ослабляется внешним замедлителем-рефлектором, который, наряду с отражением внешних фоновых нейтронов, частично отражает также и попадающие в него испарительные нейтроны обратно во внутренний объём монитора.

Внутреннее устройство секций подземного монитора (и секции Е) показано на рисунке 2 .

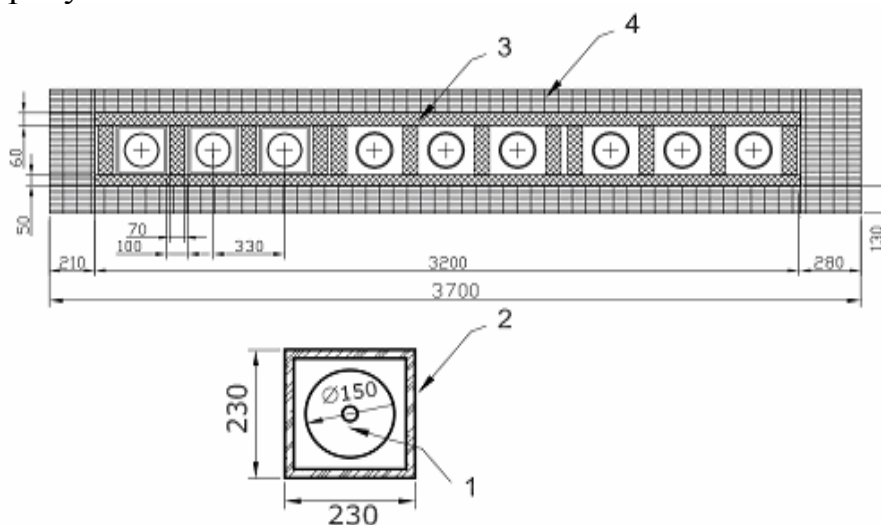


Рис. 2. Внутреннее устройство секции нейтронного монитора, находящегося в подземном помещении ТШВНС: 1 – нейтронный счётчик СНМ15, 2 – деревянный ящик (толщина стенки 20 мм), 3 – свинец, 4 – резина. Размеры указаны в миллиметрах.

Так же как и в супермониторе, детекторами нейтронов в этих секциях служат пропорциональные нейтронные счётчики СНМ15, помещённые внутри лёгкого вещества-замедлителя. В качестве последнего используются прямоугольные деревянные ящики квадратного сечения с толщиной стенки 20 мм; замедление нейтронов происходит благодаря их упругим столкновениям с ядрами углерода и водорода внутри органического вещества. Поглотитель подземного монитора собран из прямоугольных свинцовых блоков, а внешним замедлителем-рефлектором служит слой обогащённой углеродом и водородом резины.

Далее рассматривается проблема абсолютной энергетической калибровки нейтронного монитора [7]. Задача заключается в выводе функции, связывающей зарегистрированное счётчиками монитора количество нейтронных сигналов (кратность нейтронов M) с энергией взаимодействия первичного адрона E_n . Применяемая методика энергетической калибровки основывается на экспериментально измеренной зависимости интенсивности наблюдаемых на мониторе нейтронных событий от числа зарегистрированных нейтронов – спектре нейтронных событий по их кратности M [12, 14, 15]. В каждом событии кратность M определялась как суммарное число нейтронных импульсов, зарегистрированных на протяжении фиксированного периода временного сканирования T_s общей длительностью 5100 мкс. Для случая Тянь-Шаньского нейтронного супермонитора 18НМ64 такой спектр показан светлыми кружками на рисунке 3.

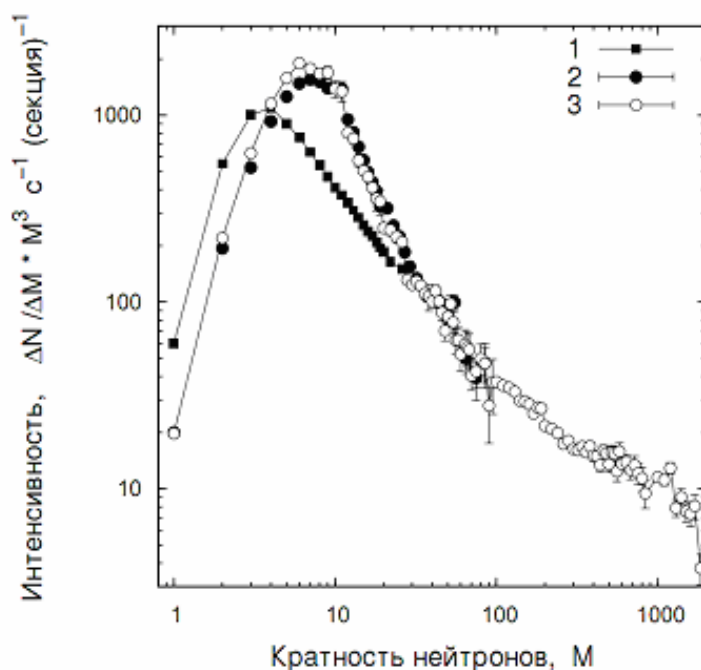


Рис. 3. Экспериментальный спектр кратности нейтронных событий, регистрируемый на Тянь-Шаньском нейтронном супермониторе НМ64 (3) вместе с «истинным» (1) и соответствующим «восстановленным» (2) спектрами кратности. Спектры относятся к одной стандартной секции супермонитора НМ64, содержащей шесть нейтронных счётчиков СНМ15.

Характерная особенность нейтронного монитора состоит в том, что образующиеся в первичном взаимодействии испарительные нейтроны в течение сравнительно большого, порядка нескольких миллисекунд, промежутка времени диффундируют внутри полиэтиленового замедлителя после своей термализации. Вследствие этого обстоятельства, при измерении спектра кратности нейтронных событий необходимо принимать во внимание возможные искажения его формы, возникающие из-за продолжительного присутствия тепловых нейтронов в мониторе. Эти искажения представляют собой, во-первых, систематический недомер интенсивности событий в области малых значений кратности, $M = 1 - 3$, возникающий из-за их взаимного перекрытия, и, во-вторых, недосчёт нейтронных импульсов в событиях с большой кратностью, $M \geq 1000$, как результат ограниченной длительности временного скана T_s и экспоненциального распределения интенсивности диффундирующих нейтронов во времени. Оба эти эффекта зависят от формы временного распределения интенсивности сигналов, поступающих от нейтронных детекторов монитора при регистрации нейтронных событий, которое в нашем эксперименте измерялось с помощью специальной электронной системы. Используя это распределение, в экспериментально измеренный спектр кратности (спектр 3 на рисунке 3) были внесены поправки, позволяющие восстановить истинную, неискаженную форму спектра (спектр 1 на том же рисунке).

К решению вопроса об энергетической калибровке нейтронного монитора можно подойти, используя связь между экспериментальным спектром кратности $R(M)$ и энергетическим спектром адронной компоненты космических лучей $F(E_h)$, который известен по измерениям на Тянь-Шаньском ионизационном калориметре и хорошо аппроксимируется степенной формулой: $F_h(E_h) = 32 \cdot E_h^{-2.55} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{степ}^{-1} \cdot \text{ГэВ}^{-1}$. Спектры $R(M)$ и $F(E_h)$ связаны между собой известным соотношением :

$$R(M) = S\omega\eta \sum_{\nu=M}^{\infty} C_{\nu}^m \epsilon^m (1-\epsilon)^{\nu-m} \cdot I(\nu); \quad I(\nu) = \int_{\text{thresh}}^{\infty} F(E_h) W(\nu, E_h) dE_h$$

где $S\omega$ – это светосила секции монитора (произведение её площади на телесный угол обзора), η – вероятность взаимодействия адронов в генераторе монитора, $W(\nu, E_h)$ – распределение вероятности генерации события со множественностью нейтронов ν адроном с энергией E_h (функция генерации испарительных нейтронов), а член $C_{\nu}^m \epsilon^m (1-\epsilon)^{\nu-m}$ представляет собой биномиальную вероятность зарегистрировать M нейтронов из ν при эффективности их регистрации ϵ .

Если вид спектров $R(M)$ и $F(E_h)$ известен из измерений, то, варьируя параметры зависимости $W(\nu, E_h)$, можно подобрать такой вид функции генерации, который бы удовлетворял уравнению для $I(\nu)$. Определив затем соответствующую этой функции среднюю множественность генерируемых в ядерных расщеплениях испарительных нейтронов $\bar{\nu}(E_h)$ и используя известное

значение для эффективности регистрации ϵ можно будет получить соотношение $M = \epsilon \cdot \bar{\nu}(E_h)$, которое и следует использовать в качестве калибровочной зависимости для супермонитора НМ64.

Для Тянь-Шаньского нейтронного супермонитора 18НМ64 эффективность регистрации ϵ была измерена экспериментально с помощью калиброванного источника тепловых нейтронов; её усреднённое по площади секции значение составляет 4,5%. Если теперь принять экспоненциальную зависимость для функции генерации испарительных нейтронов:

$$W(\nu, E_h) = \frac{1}{\nu(E_h)} \exp\left(-\frac{\nu}{\nu(E_h)}\right);$$

где $\bar{\nu}(E_h)$ есть средняя множественность нейтронов, генерируемых в адронном взаимодействии с энергией E_h . то окажется, что показанный на рисунке 3 спектр кратности $R(M)$ хорошо согласуется с энергетическим спектром $F(E_h)$ в случае, если средняя множественность испарительных нейтронов связана с энергией адронного взаимодействия степенным образом $\bar{\nu}(E_h) = 33 \cdot E_h^{0.55}$, а нижний предел интегрирования в правой части приведённого выше уравнения, то есть пороговая энергия для регистрации первичного адрона в мониторе, равняется 160 МэВ. С учётом указанного значения эффективности $\epsilon = 0,045$ отсюда следует, что

$$M = 1.48 \cdot E_h^{0.55}, \text{ или } E_h = 0.49 \cdot M^{1.8},$$

где энергия E_h измеряется в ГэВ. Эти две формулы и представляют собой искомую калибровочную зависимость для нейтронного супермонитора типа НМ64; с точностью порядка 15 – 20% они применимы в широкой области энергий 0,4 – 10000 ГэВ.

Рассчитанная описанным образом на основе экспериментального спектра кратности энергетическая зависимость средней множественности испарительных нейтронов проверялась путём моделирования методом Монте-Карло процессов генерации, замедления и диффузии нейтронов внутри супермонитора НМ64.

Апробированные модели взаимодействия адронов высокой энергии с веществом монитора и процессов последующей термализации и диффузии испарительных нейтронов были использованы при разработке проекта орбитального ионизационно-нейтронного калориметра ИНКА [4, 9, 11, 13, 16 – 21].

Исследования, аналогичные описанным выше, были проделаны и для нестандартной конфигурации, которая использовались в подземных мониторах Тянь-Шаньской станции. Для этого на поверхности станции, в непосредственной близости к секциям супермонитора 18НМ64 была установлена дополнительная секция, Е, устройство которой полностью повторяет устройство секций подземного монитора. Спектр кратности нейтронных событий, которые регистрируются в секции Е, показан светлыми кружками на левом графике рисунка 4.

Коррекция экспериментально измеренного спектра для секции Е проводилась согласно описанной выше методике; полученный в результате этой процедуры «истинный» спектр кратности показан на том же графике чёрными квадратами. На правом графике рисунка 4 скорректированный спектр кратности нейтронных событий в секции Е сравнивается с аналогичным ему скорректированным спектром событий, наблюдаемых в секциях Тянь-Шаньского нейтронного супермонитора (соответственно, спектры (2) и (1)). Оба спектра нормированы на суммарное живое время измерений и на площадь секции монитора (7 м^2 для секции Е и 6 м^2 для секций супермонитора). Пунктиром показано направление линий равной интенсивности событий, наблюдаемых на этих двух установках (из-за того, что ось ординат графика умножена на M^3 , эти линии оказываются наклонными, а не параллельными, к оси абсцисс). Видно, что при одной и той же интенсивности событий кратность нейтронов в секции Е превышает кратность в секциях супермонитора НМ64 на 20 – 25%. Поскольку толщина свинцового поглотителя в обеих установках одинакова, эта разница может возникать только из-за различия эффективности мониторов по отношению к регистрации испарительных нейтронов. Используя известное для Тянь-Шаньского супермонитора 18НМ64 значение эффективности $\epsilon=4,5\%$, получаем, что эффективность секции Е, так же как и секций подземного монитора, должна составлять 5 – 6%. Соответственно этому значению эффективности для подземного монитора должны быть изменены числовые коэффициенты в приведённых выше калибровочных формулах.

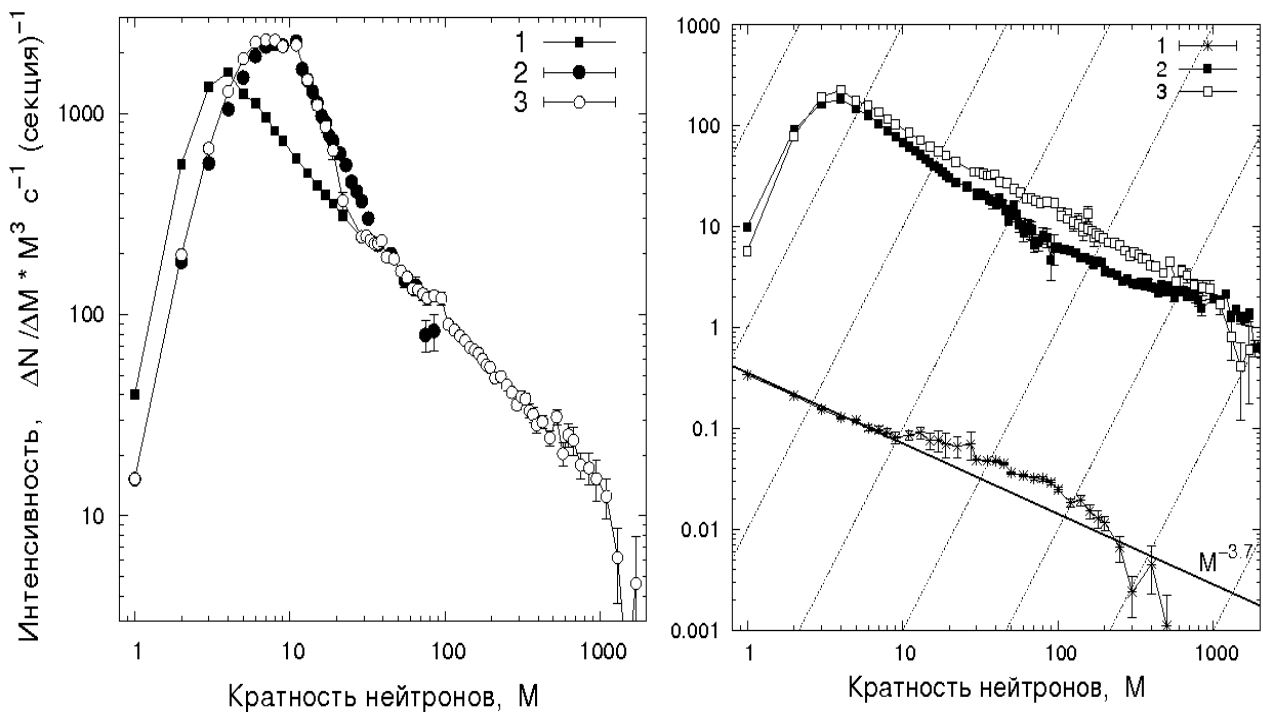


Рис. 4. Экспериментальные спектры кратности нейтронных событий: слева – в работающей на поверхности ТШВНС секции Е, справа: 1 – в секциях Е нейтронного супермонитора 18НМ64, 2 – в секции Е, 3 – на подземном нейтронном мониторе.

В третьем разделе диссертации рассматриваются результаты эксперимента по регистрации нейтронных событий в подземном помещении Тянь-Шаньской станции.

Дифференциальный спектр кратности событий, зарегистрированных на подземном мониторе в серии измерений I (с горизонтальным расположением секций монитора в одной плоскости) показан на правом графике рисунка 4 [2]. Как видно из этого графика, дифференциальный спектр кратности в подземном мониторе с достаточной степенью точности может быть представлен в виде простой степенной зависимости с показателем наклона $-3,7$. Такая форма спектра близка к форме спектра, который регистрируется в работающих на поверхности ТШВНС мониторах (отличие в показателях их наклона не превышает 0,3), несмотря на то, что природа частиц, ответственных за нейтронные события в этих установках, должна быть совершенно различной. Действительно, на поверхности нейтронные события генерируются адронами космических лучей, которые на пути к подземному помещению должны практически полностью поглощаться грунтом: пробег поглощения адронной компоненты составляет $\Lambda = 120 - 130 \text{ г/см}^2$, и слой поглотителя толщиной 2000 г/см^2 должен ослаблять поток адронов более чем в 10^6 раз. В то же время, как это видно на рисунке 4, абсолютные интенсивности нейтронных событий на подземном мониторе и в однотипной с ним секции E (которая работает на поверхности) отличаются только в 600 – 800 раз. Такому соотношению интенсивностей соответствует величина пробега поглощения нейтронообразующей компоненты порядка $300 - 320 \text{ г/см}^2$, что в 2,5 – 3 раза превосходит указанное значение Λ_n для адронной компоненты космических лучей. Наблюдаемая интенсивность нейтронных событий в подземном мониторе означает, что эти события должны происходить от взаимодействия частиц, которые имеют проникающие свойства мюонов.

Дифференциальный энергетический спектр рождаемых мюонами в свинце тормозных гамма-квантов известен как по измерениям с ионизационным калориметром, так и из рентгенэмульсионных экспериментов; его можно представить в виде степенной зависимости с показателем наклона $\gamma = 3,65 - 3,7$, что близко к наклону измеренного на подземном мониторе спектра кратности. Наши измерения множественности образующихся в электромагнитных взаимодействиях испарительных нейтронов, которые проводились на ускорителях в Протвино и ФИАН для свинцовой мишени в интервале энергий от 100 МэВ до 26 ГэВ, дают линейную зависимость среднего выхода нейтронов $\bar{\nu}$ от энергии электромагнитных каскадов: $\bar{\nu} = 0,3 \cdot E_{e,\gamma} [20 - 21, 23 - 25]$, если энергия $E_{e,\gamma}$ измерена в ГэВ. Такой же вид имеет зависимость $\bar{\nu}(E)$ полученная в результате расчётов по программам SHIELD и GEANT, а также зависимость $\bar{\nu}(E)$, полученная экспериментально при измерениях в космических лучах для поглотителей с малым атомным весом ($A < 12$). Используя полученную ранее оценку эффективности регистрации

испарительных нейтронов в подземном мониторе $\epsilon=5 - 6\%$, можно вывести линейную формулу для средней множественности (кратности) нейтронов, регистрируемых на подземном мониторе в предположении, что ответственными за генерацию нейтронных событий частицами являются мюоны:

$$M = M_0 E_{e,\gamma} \text{ ,}$$

где энергия $E_{e,\gamma}$ измерена в ТэВ, а $M_0 \cong 16$.

На рисунке 5 точками показан интегральный спектр кратности для подземного нейтронного монитора, полученный пересчётом рассмотренного выше дифференциального спектра. Используя указанную линейную зависимость и интегрируя известный дифференциальный энергетический спектр тормозных гамма-квантов, можно рассчитать ожидаемый спектр кратности нейтронов, образующихся в результате тормозного излучения мюонов. Этот спектр изображён на рисунке 5 жирной прямой линией с параметром $M_0=16$, причем его интенсивность оказывается в 20 – 30 раз ниже, чем интенсивность экспериментального спектра. На рисунке 5 показано несколько прямых, соответствующих ожидаемым интегральным спектрам кратности для различных M_0 , причем видно, что интенсивность экспериментального спектра согласуется со значением M_0 , лежащим в пределах 55 – 60. Такое значение M_0 соответствует в 3 – 4 раза более высокому выходу испарительных нейтронов в электромагнитных каскадах от мюонов, чем выход, наблюдавшийся в экспериментах с электронными пучками на ускорителях и подтверждённый модельными расчётами.

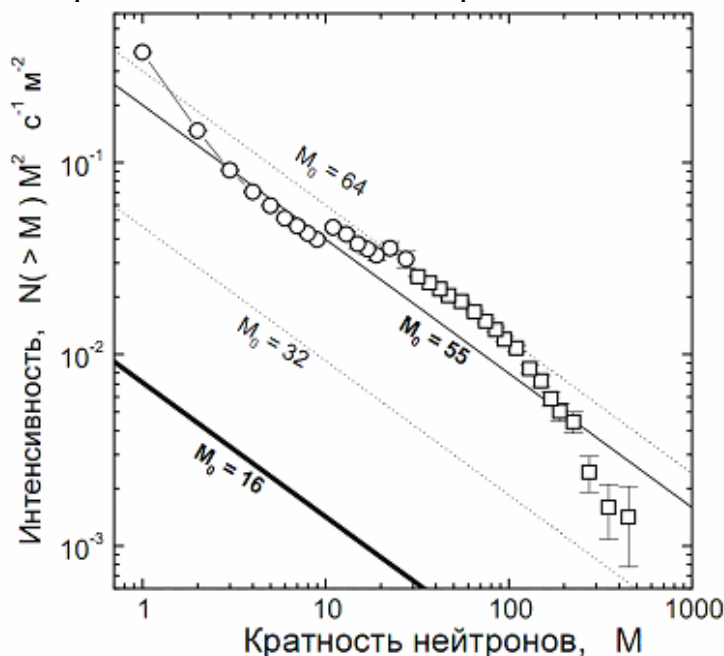


Рис. 5. Интегральный спектр кратности нейтронов в подземном мониторе ТШВНС. Точки – экспериментальные данные, прямые – набор спектров, рассчитанных для гамма-квантов от тормозного излучения мюонов при различных значениях параметра M_0 .

Таким образом, при попытке интерпретации измеренного на подземном мониторе спектра кратности нейтронных событий как результата взаимодействий мюонной компоненты космических лучей со свинцовым поглотителем монитора встречаются большие трудности. Трудность такой интерпретации ещё больше увеличивается, если обратиться к показанным на рисунке 6 спектрам кратности, которые были получены во второй серии измерений, когда две секции подземного монитора А и В располагались вертикально друг над другом [3]. На этом рисунке видно, что при вертикальном расположении секций монитора в их спектрах выделяются две области, в которых характеристики событий существенно различны: область значений $M \sim 1 - 2$, где интенсивность событий в верхней секции превышает интенсивность событий в нижней секции, и область $M > 3$, в которой соотношение интенсивностей противоположно, причем отношение между интенсивностями в обеих секциях достигает 1,5 – 2. Это обстоятельство означает, что та компонента космических лучей, которая ответственна за нейтронные события под землей, должна быть способной к генерации ядерных каскадов внутри верхней секции монитора, то есть это не могут быть мюоны.

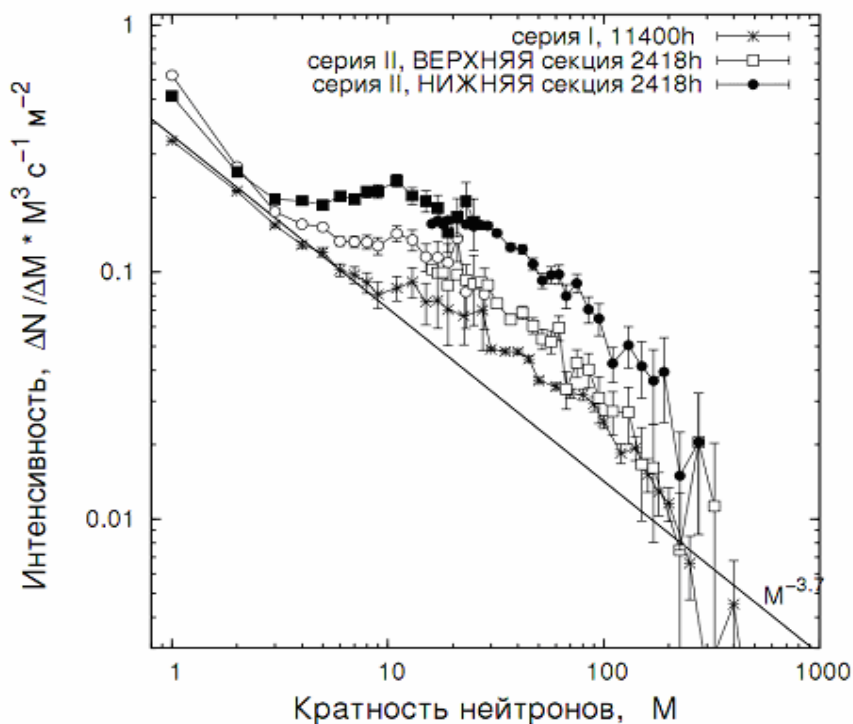


Рис. 6. Дифференциальные спектры кратности нейтронных событий на подземном мониторе при вертикальном расположении двух секций в серии измерений II.

Обращает на себя внимание также сложная форма спектров в обеих секциях: вместо простой степенной зависимости в области с показателем наклона около 3,7, к которой близка форма спектра серии I, во второй серии спектры как в верхней, так и в нижней секциях выполаживаются, так что показатель их наклона, начиная уже со значений кратности $M \sim 4 - 5$, не превышает значения 3,0 вплоть до $M \sim 15 - 20$ (слабые признаки уплощения в

этой области заметны и в спектре серии I). Поскольку выход нейтронов от образуемых мюонами в свинце электромагнитных каскадов связан с энергией простой линейной зависимостью, сложная форма спектров кратности событий на подземном нейтронном мониторе свидетельствует против «мюонной» интерпретации этих спектров.

Ещё одним источником наблюдаемых в подземном помещении Тянь-Шаньской станции нейтронных событий могли бы стать медленные (тепловые) нейтроны фона [1]. Чтобы проверить эту возможность, была проведена дополнительная серия измерений, на протяжении которой нейтронные счётчики СНМ15 были вынуты из нейтронного монитора и работали непосредственно «на открытом воздухе», вне каких-либо мишеней из тяжёлого вещества или слоев замедлителя. Поскольку эти счётчики чувствительны лишь к нейтронам тепловых энергий, то при таком расположении они могут регистрировать только уже замедленные фоновые нейтроны из окружающей среды. Местоположение нейтронных счётчиков несколько раз изменялось: они последовательно располагались непосредственно рядом с секциями нейтронного монитора, в дальнем от монитора конце подземного помещения и вне этого помещения, в подземном туннеле. Полученные во всех этих местах спектры кратности тепловых нейтронов показаны на рисунке 7. Видно, что при любом расположении нейтронных счётчиков эти спектры имеют чрезвычайно крутой наклон (с показателем не менее 6), резко отличаясь по своей форме от спектров, регистрируемых на подземном мониторе. Такое различие в спектрах, а также очень низкая, на 2 – 3 порядка величины меньшая, чем в мониторе, общая интенсивность фоновых нейтронов означают, что их вклад в генерацию событий на подземном нейтронном мониторе должен быть пренебрежимо мал.

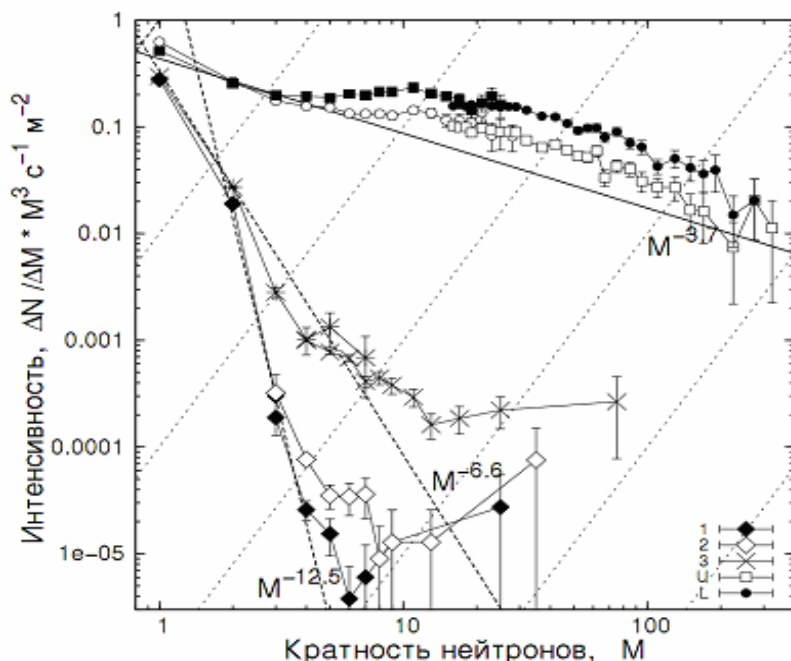


Рис. 7. Дифференциальные спектры кратности нейтронных событий: 1 – в подземном помещении ТШВНС; 2 – в туннеле перед входом в подземное помещение; 3 – рядом с подземным нейтронным монитором. Для сравнения показаны спектры кратности в верхней U и нижней L секциях монитора.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1. Разработана и применена на практике методика коррекции экспериментально измеренного спектра кратности событий, регистрируемых на нейтронном мониторе, и восстановления по этим данным истинного энергетического спектра адронной компоненты космического излучения в области низких энергий.

2. С помощью этой методики были впервые получены формулы абсолютной энергетической калибровки для Тянь-Шаньского нейтронного супермонитора 18НМ64, которые с точностью 15 – 20% справедливы для случая регистрации одиночных адронов в широком диапазоне энергий 0,4 – 10000 ГэВ. Одновременно была экспериментально получена оценка для эффективности регистрации испарительных нейтронов в супермониторе, а на основе формы зарегистрированного на нем спектра кратности нейтронных событий был сделан вывод об относительно высокой, около 150 – 160 МэВ, величине энергетического порога регистрации адронов. Полученная в процессе решения задачи об энергетической калибровке монитора функция генерации испарительных нейтронов была протестирована с помощью модельных расчётов по программам SHIELD и GEANT, которые опирались на результаты измерения множественности нейтронов в экспериментах на ускорителе.

3. С применением нейтронного монитора новой конструкции впервые в мире на высоте гор был поставлен эксперимент по регистрации нейтронных событий в на глубине 2000 г/см² под землей; для этих событий был получен спектр кратности нейтронов и исследованы другие их характеристики (временное распределение нейтронных сигналов, пространственное распределение нейтронов, корреляции в множественности нейтронов между отдельными секциями монитора и др.).

4. С помощью детекторов подземного нейтронного монитора впервые была измерена интенсивность фона тепловых нейтронов в подземном помещении на высоте гор.

5. На основании полученного на подземном нейтронном мониторе экспериментального материала был сделан вывод о том, что в данном эксперименте возможно проявление проникающей, слабо взаимодействующей в веществе компонентой космических лучей немюонной природы, которая способна к генерации в 4 – 5 раз большего, чем обычные мюоны, количества ядерно-активных частиц при своих взаимодействиях.

Список публикаций по теме диссертации

1. Chubenko A.P., Shepetov A.L., Antonova V.P. et al. // *The influence of background radiation on the events registered in a neutron monitor at mountain heights* // J.Phys.G: Nucl.Part.Phys. **35**, 085202 (2008).
2. Chubenko A.P., Shepetov A.L., Chubenko P.A. et al // *The underground neutron events at Tien-Shan* // Proc. of 30th ICRC (2007), Mexico City, Mexico, 2008, Vol. 4 (HE part 1), pages 3 – 6.
3. Чубенко А.П., Щепетов А.Л., Вильданова Л.И. и др.// *Нейтронные события в подземном мониторе Тянь-Шаньской высокогорной станции* // Краткие сообщения по физике ФИАН, Москва, 2007, 4, с.21 – 31.
4. Ammosov V.V., Britvich G.I., Chubenko A.P. et al. // *The modern concept of the INCA project elements* // Nucl.Phys. (Proc.Suppl.) **151**, 426 – 429 (2006).
5. Britvich G.I., Chernichenko S.K., Chubenko A.P., Gilitsky Yu.V., Kushnirenko A.E., Mamidzhanyan E.A., Pavlyuchenko V.P., Shein I.V., Soldatov A.P., Shepetov A.L., Vasil'chenko V.G.// *The large scintillation charged particle detector of the Tien-Shan complex "ATHLET"* // NIM in Physical Research A **564**, 225 – 234 (2006).
6. Чубенко А.П., Щепетов А.Л., Бабаев М.К., Байгубеков С., Застрожнова Н.Н., Мартьянов И.С., Новолодская О.А., Оскомов В.В., Садыков Т.Х., Садуев Н.О., Тулеген Ж.Т. // *Аномально запаздывающие частицы по данным нейтронных мониторов на трех уровнях наблюдения в атмосфере* // Известия РАН, сер. физическая, т. 69, № 3, с. 379 – 381, (2005).
7. Нестерова Н.М., Мухамедшин Р.А., Павлюченко В.П., Чубенко А.П., Щепетов А.Л. // *Потоки адронов с энергией 10 - 2000 ГэВ в ШАЛ от ПКИ в области 1-100 ПэВ по Тянь-шаньским данным* // Изв. РАН, Сер.физ., т. 69, № 3, с. 337 – 339, (2005).
8. Чубенко А.П., Щепетов А.Л., Антонова В.П., Вильданова Л.И., Крюков С.В., Мухамедшин Р.А., Нестерова Н.М., Оскомов В.В., Садыков Т.Х. // *Проблема аномально запаздывающих нейтронных сигналов в стволах ШАЛ с числом частиц выше 10^6 на уровне гор* // Известия РАН, сер. физическая, т. 69 , №3, с. 376 – 378, (2005).
9. Аммосов В.В., Жуков А.П., Зацепин Г.Т., Чубенко А.П. и др.// *Повышение эффективности регистрации нейтронов в ионизационно-нейтронном калориметре* // Краткие сообщения по физике, ФИАН, Москва, №10, с. 40 – 48, (2005).
10. Britvich G.I., Vasil'chenko V.G., Gilitsky Yu.V., Chubenko A.P., Kushnirenko A.E., Mamidzhanyan T.F., Pavluchenko V.P., Pikalov V.A. et al. // *A neutron detector on the basis of boron-containing plastic scintillator* // Nuclear Instruments and Physics Research A, **500**, 343 – 358, (2005).
11. A.P. Chubenko, R.A. Mukhamedshin, V.V. Ammosov et al. // *The Modern Concept of the INCA Project* // Proc. of 28th ICRC (2003), Tsukuba, pp.2221 – 2224.
12. Chubenko A.P., Shepetov A.L.,Antonova V.P. et al. // *Multiplicity Spectrum of NM64 Neutron Supermonitor and Hadron Energy Spectrum at Mountain Level* // Proc. of 28th ICRC (2003), Tsukuba, 977 – 980.
13. Александров К.В., Аммосов В.В., Антонова В.П., Чубенко А.П. и др.// *Проект ИНКА для исследования спектра первичного космического излучения* // Изв. РАН, Сер.физ., т.66, 11, 2002, с. 1624 – 1627.

14. Антонова В.П., Вильданова Л.И., Жуков В.В., Чубенко А.П. и др. // *Калибровка нейтронного монитора НМ64 и связь спектра кратностей с энергетическим спектром адронов на уровне гор* // Изв. РАН, Сер. физ., т.66, 11, 2002, с. 1578 – 1580.
15. V.P. Antonova, A.P. Chubenko, S.V. Kryukov et al. *Anomalous time structure of extensive air shower particle flows in the knee region of primary cosmic ray spectrum* // *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, v.28, 2, 2002, pp. 251 – 266.
16. Alexandrov K.V., Ammosov V.V., Chechin V.A., Chubenko A.P. et al. // *The INCA Project: Present Status and Outlook* // Proc. Of Conference on Particle and Fundamental Physics in Space (Space Part 2002), May 14-19, Italy.
17. Alexandrov K.V., Ammosov V.V., Chubenko A.P. et al. // *The INCA Collaboration: Present status and outlook* // Proc. Of the 27th International Cosmic Ray Conference, Hamburg, 2001, OG-106, p. 2171 – 2174.
18. Alexandrov K.V., Ambrosio M., Ammosov V.V., Chubenko A.P. et al. // *A new method of ionization-neutron calorimeter for direct investigation of high-energy electrons and primary nuclei of cosmic rays up to the “knee” region* // *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A* 459 (2001) p.135 – 156.
19. Alexandrov K.V., Ambrosio M., Ammosov V.V., Chubenko A.P. et al. // *The INCA Project I. Astrophysical Goals and the Concept of an Ionization-Neutron Calorimeter for Direct Investigation of Ultimate-Energy Electrons and Primary Cosmic-Ray Nuclei up to the “Knee” Region.* // Proc. Of the 26th International Cosmic Ray Conference, Salt Lake City, 1999, v. 3, p. 219 – 222.
20. Alexandrov K.V., Ambrosio M., Ammosov V.V., Chubenko A.P. et al. // *Measurements of the Neutron Yield from a lead absorber for pion and proton projectiles.* // Proc. Of the 26th International Cosmic Ray Conference, Salt Lake City, 1999, v. 3, p. 195 – 198.
21. Alexandrov K.V., Ambrosio M., Ammosov V.V., Chubenko A.P. et al. // *New Approach to Measurement of Energy of Primary Protons and Nuclei* // Proc. Of the 26th International Cosmic Ray Conference, Salt Lake City, 1999, v. 3, p. 215 – 218.
22. Антонова В.П., Нестерова Н.М., Вильданова Л.И., Чубенко А.П. и др. // *Пространственные и временные распределения адронной компоненты в ШАЛ по данным нейтронного монитора 18NM-64.* // Изв. РАН, Сер. физ., 1999, т. 63, 3, с. 525 – 529.
23. Александров К.В., Зацепин Г.Т., Кузнецов Е.П.,..., Чубенко А.П. и др. // *О возможности повышения энергетического разрешения и способности разделения событий заряженного и нейтрального токов нейтринных калориметров MINOS и NOE* // Доклады Академии Наук, 1998, том 363, № 5, стр. 610 – 614.
24. Аммосов В.В., Мерзон Г.И., Рябов В.А., Чубенко А.П. и др. // *Исследование характеристик ионизационно-нейтронного калориметра в адронных пучках (4-70 ГэВ) ускорителя ИФВЭ* // Письма в ЖТФ, 1998, т.24, 18, с. 35 – 42.
25. Мерзон Г.И., Рябов В.А., Сайто Т., Сасаки Х., Чубенко А.П., Щепетов А.Л. // *О возможности увеличения резекции протонов при регистрации первичных электронов космического излучения с помощью ионизационно-нейтронного калориметра* // Письма в ЖТФ, 1998, т.24, 18, с. 66 – 73.