

На правах рукописи

Стенькин Юрий Васильевич

**Исследование нейтронной компоненты широких
атмосферных ливней как новый метод изучения
космических лучей сверхвысоких энергий**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико – математических наук

Москва 2010

Работа выполнена в Учреждении российской академии наук
Институте ядерных исследований РАН

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор

Степанов Александр Васильевич

доктор физико-математических наук,
профессор

Стожков Юрий Иванович

доктор физико-математических наук

Хренов Борис Аркадьевич

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования «Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ»»

Защита состоится « ____ » _____ 2010 г.

в ____ часов ____ мин. на заседании Диссертационного совета Д 002.119.01
Учреждения Российской академии наук Института ядерных исследований РАН
по адресу: 117312 Москва, проспект 60-летия Октября, дом 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской
академии наук Институте ядерных исследований РАН.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2010 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.119.01

кандидат физико-математических наук

Б.А. Тулупов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Изучение нейтронной компоненты космических лучей началось еще в первой половине прошлого века. В конце 40-х годов были проведены первые эксперименты, выполненные Ваной Тонджорджи под руководством и при участии таких известных физиков как Грейзен и Коккони, показавшие, что в составе Широких Атмосферных Ливней (ШАЛ) имеются нейтроны. По тем временам это было совершенно неожиданно, т. к. тогда считалось, что ШАЛ представляет собой чисто электромагнитный каскад в атмосфере (только в конце 40-х - начале 50-х годов в работах Г.Т. Зацепина было доказано, что ШАЛ представляет собой адронный ливень). Следует отметить, что уже в этих первых экспериментах были сделаны совершенно правильные выводы относительно природы наблюдаемого явления, т. к. эксперимент проводился на разных высотах и в различных модификациях: нейтронные борные счетчики окружались различными материалами (парафином, свинцом, кадмием) в различных комбинациях. Было количественно показано, что регистрируемые нейтроны производятся адронами высокой энергии, идущими в составе ШАЛ и что доля этих частиц составляет 2-3%. Было также отмечено, что испарительные нейтроны с энергией несколько МэВ производятся не только в свинце, железе или углероде, но и в любом другом веществе, окружающем детекторы, включая и слой воздуха над установкой. К сожалению, результаты этих прекрасных экспериментов были позднее незаслуженно забыты.

В 50-е годы прошлого века, с появлением мировой сети нейтронных мониторов, приборов специально созданных для изучения нейтронной компоненты космических лучей, началось систематическое экспериментальное изучение вариаций потока нейтронов в космических лучах. Нейтронный монитор регистрирует, как правило, нейтроны (адроны) с энергией от сотен МэВ до нескольких Гэв, с помощью создаваемых ими вторичных нейтронов, рожденных и замедленных внутри монитора. Вероятность того, что тепловой нейтрон проникнет извне внутрь монитора и будет зарегистрирован, крайне

мала ($\sim 10^{-4}$). При этом существует однозначная связь между количеством зарегистрированных в одном событии нейтронов и энергией упавшего на монитор адрона. События с кратностью зарегистрированных нейтронов более ~ 100 представляют собой события, когда ось широкого атмосферного ливня (ШАЛ) достаточно высокой энергии оказалась в непосредственной близости от монитора либо прямо в нем. Такие события мы будем называть *нейтронными вспышками*.

Применение нейтронных мониторов и адронных калориметров в составе установок для регистрации ШАЛ началось тоже достаточно давно, однако эти приборы, созданные для решения совершенно других задач, имеют весьма ограниченную регистрирующую площадь, не приспособлены для изучения мощных событий типа нейтронных вспышек, вызванных множественным прохождением высокоэнергичных адронов, и не могут служить основой для создания специализированных установок для изучения космических лучей сверхвысоких энергий.

В диссертации предлагается новый метод изучения космических лучей сверхвысоких энергий с помощью установки нового типа, в которой основной упор будет сделан на исследование главной компоненты ШАЛ – адронной, путем регистрации вторичных нейтронов сетью специализированных неэкранированных сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов, распределенных по большой площади.

Цель работы

Экспериментальное изучение и теоретическое объяснение различных аспектов проблемы, связанной с нейтронным сопровождением ШАЛ и разработка на этой основе нового метода изучения космических лучей сверхвысоких энергий.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

- Разработка детектора нового типа для регистрации тепловых нейтронов.
- Проведение экспериментов на нейтронном мониторе 6НМ64 в г. Мехико (Институт геофизики, университет UNAM, Мексика) и на нейтронном

мониторе 6НМ64 Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН с целью исследования событий с большой кратностью регистрируемых нейтронов (*нейтронных вспышек*).

- Разработка нового метода изучения ШАЛ с упором на регистрацию адронной компоненты и создание проекта установки, использующей данный метод (проект PRISMA).
- Создание двух прототипов установки PRISMA (в горах и на равнине) и проведение экспериментов на них.

Научная новизна

Научную новизну работы характеризуют следующие основные результаты:

- Создан новый сцинтилляционный детектор тепловых нейтронов, обладающий достаточно высокими быстродействием и эффективностью регистрации нейтронов при малой чувствительности к одиночным заряженным частицам и низким уровнем собственных шумов.
- Впервые дано естественное ядерно-физическое объяснение наблюдаемому на нейтронных мониторах явлению «нейтронная вспышка» через процесс образования в мониторе и в окружающем его веществе большого количества вторичных (испарительных) нейтронов при попадании оси ШАЛ в монитор или прохождении поблизости от него. При этом большие наблюдаемые задержки сигналов во внешних детекторах объясняются вовсе не “запаздывающей компонентой ШАЛ”, а относительно большим временем жизни до захвата тепловых нейтронов (~1 мс) в обычных веществах, типа грунта или бетона, и их медленным движением.
- Впервые предложено использовать данное явление в экспериментальной практике для изучения адронной компоненты ШАЛ, а, следовательно, и космических лучей сверхвысоких энергий.
- Впервые реализовано и апробировано данное предложение в виде создания двух действующих прототипов будущей установки нового типа по изучению ШАЛ.

- Впервые показано, что регистрируемые такой установкой для изучения ШАЛ тепловые нейтроны имеют двойное происхождение: они могут быть *локальными*, т. е. рожденными локально вблизи установки, либо *атмосферными*, рожденными в атмосфере над установкой.
- Также впервые показано, что указанные два типа нейтронных потоков имеют существенно различные временные распределения и могут быть разделены экспериментально по времени прихода.

Практическая значимость

- Разработанный и созданный большой детектор тепловых нейтронов на основе неорганического сцинтиллятора ZnS(Ag) с добавкой вещества, имеющего большое сечение захвата тепловых нейтронов - ${}^6\text{Li}$, показавший очень хорошие эксплуатационные качества как при регистрации нейтронной, так и электронной компонент, может быть рекомендован в качестве базового детектора для создания установок нового поколения для изучения ШАЛ.
- Разработанный и апробированный метод изучения ШАЛ может быть рекомендован к применению при создании установок нового поколения для изучения спектра космических лучей и их химического состава.
- Созданный детектор тепловых нейтронов, показавший хорошую долговременную стабильность, может быть использован для проведения долговременных измерений фоновых потоков тепловых нейтронов, как в низкофоновых подземных экспериментах, так и для мониторинга и для изучения вариаций различных потоков нейтронов.

Работы по теме диссертации выполнялись при поддержке РФФИ практически на всех этапах исследований (гранты: 00-02-17591-а, 02-02-17290-а, 05-02-17395-а, 07-02-00964-а, 08-02-01208-а, 09-02-92426-КЭ_а, 09-02-12380-офи_м), Программы Президиума РАН “Нейтронная физика” и Программы поддержки ведущих научных Школ: НШ-1828.2003.02, НШ-4580.2006.02, НШ-321.2008.2.

Основные результаты работы, выносимые на защиту:

- Создание высокочувствительного сцинтилляционного детектора тепловых нейтронов на основе неорганического сцинтиллятора ZnS(Ag) с добавкой ${}^6\text{LiF}$ для регистрации нейтронов в ШАЛ и для изучения фоновых потоков тепловых и надтепловых нейтронов.
- Результаты исследований, проведенных на нейтронных мониторах NM64, в БНО ИЯИ РАН и в университете г. Мехико (Instituto de Geofisica, UNAM).
- Методика регистрации тепловых нейтронов, сопровождающих ШАЛ, и методика их разделения на “локальные” и “атмосферные”.
- Проект установки нового типа для изучения ШАЛ с упором на регистрацию адронной компоненты ШАЛ (проект PRISMA для изучения космических лучей сверхвысоких энергий).
- Создание двух прототипов установки PRISMA (на уровне моря и в горах на высоте 1700 м над уровнем моря) и полученные на них результаты измерений.

Личный вклад автора

Автору принадлежат основные идеи, использованные в работе:

- создание большого сцинтилляционного детектора тепловых нейтронов на основе светосостава СЛ6-5 (ZnS(Ag)+ ${}^6\text{LiF}$)
- постановка и проведение всех описанных в диссертации экспериментов;
- идея создания установки нового типа для изучения ШАЛ;
- создание двух действующих макетов установки нового типа;
- разработка проекта установки PRISMA;
- создание ON-LINE программ;
- разработка алгоритмов обработки данных и их анализ;
- разработка алгоритмов проведения расчетов методом Монте-Карло.

Апробация работы и публикации

Результаты, послужившие основой диссертации, докладывались на:

международных конференциях:

- по космическим лучам (Солт Лейк Сити, 1999; Гамбург, 2001; Цукуба, 2003; Пуне, 2005; Мерида, 2007; Лодзь, 2009);
 - Симпозиум по взаимодействиям космических лучей сверхвысоких энергий ISVHECRI (Пилос, 2004; Вейхай, 2006; Париж, 2008);
 - Международный симпозиум по подземной физике TAUP'09 (Рим, 2009);
 - Европейский симпозиум по космическим лучам (Лодзь, 2000; Москва, 2002);
 - Школа “Физика и астрофизика космических лучей сверхвысоких энергий” (Париж, 2000)
 - Школа “Частицы и космология” (Баксан-2001; Баксан-2003; Баксан-2005);
 - Школа “Космические лучи сверхвысоких энергий” (ИЯИ, Москва, 2008);
 - Байкальская международная школа-семинар по физике космических лучей и астрофизике высоких энергий. (Tunka'2009);
- всероссийских конференциях:
- по космическим лучам (Москва, 2000, 2002, 2004, 2006, Санкт-Петербург, 2008);
 - Баксанской молодежной школе экспериментальной и теоретической физики (БМШ ЭТФ-2006, БМШ ЭТФ-2008).

Основные результаты, вошедшие в диссертацию, отражены и опубликованы (1999-2009 гг.): в 12 статьях в научных журналах, включенных в перечень ВАК для публикаций материалов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук (Ядерная физика, Известия РАН (серия физическая), Физика Земли), в 7 статьях в иностранных рецензируемых научных журналах (Astroparticle Physics, Modern Physics Letters A, Nuclear Physics B, Journal of Physics: Conf. Ser.), а также в трудах перечисленных выше конференций, симпозиумов и школ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из оглавления, списка рисунков, списка таблиц, введения, шести глав, заключения и списка литературы. Основные выводы диссертации приведены в заключении. Объем диссертации: 174 стр., 40 рисунков, 4 таблицы, 72 наименования цитируемой литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении рассмотрено современное состояние проблем, связанных с темой диссертации. Дан краткий обзор экспериментов по изучению нейтронного сопровождения ШАЛ, проводившихся с помощью нейтронных счетчиков в конце 40-х годов прошлого века и позднее на нейтронных мониторах. Показано, что наблюдавшиеся ранее в некоторых экспериментах «аномалии», могут быть объяснены с точки зрения классической ядерной физики и методики эксперимента. Обосновывается актуальность и новизна представленной диссертационной работы.

В Главе 1 рассматриваются вопросы, связанные с образованием и замедлением нейтронов в атмосфере Земли. Нейтроны, наблюдаемые наземными установками, являются вторичными. Подавляющая их часть рождается первичными космическими лучами в атмосфере Земли. Они также могут генерироваться в верхних слоях грунта, так называемыми проскочившими адронами (т. е. прошедшими сквозь атмосферу без взаимодействий с вероятностью $\sim 10^{-5}$), либо адронами ШАЛ, если энергия первичных частиц достаточна для того, чтобы вторичные адроны рожденного ей в атмосфере каскада смогли достичь уровня наземной установки (~ 100 ТэВ/нуклон).

Поверхность земли, представляет собой, в случае ШАЛ, мишень для адронов, а совместно с расположенными над ней детекторами тепловых нейтронов – своеобразный адронный калориметр, ничем принципиально не ограниченной площади.

Показано, что для объяснения наблюдаемого излома в спектре ШАЛ по числу частиц могут быть применены различные подходы. Более того, нужны именно новые подходы к решению этой чрезвычайно сложной проблемы космических лучей.

В Главе 2 приводится описание экспериментов, поставленных и проведенных автором на нейтронных мониторах 6НМ64 университета UNAM в Мексике и Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН на Сев. Кавказе.

Особенностью эксперимента в г. Мехико являлось использование

цифрового осциллографа в качестве основного регистрирующего устройства и, следовательно, наглядная информация о каждом событии. Это дало нам уверенность в том, что регистрируемые события большой кратности, которые мы назвали *нейтронными вспышками*, действительно существуют. В ходе проведения данного эксперимента был сделан вывод о непригодности пропорциональных счетчиков для подобных экспериментов из-за их плохого быстродействия, связанного с накоплением пространственного заряда. Сцинтилляционные же детекторы полностью лишены указанного недостатка и их следует применять в подобных экспериментах.

Эксперимент в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН нейтронный монитор 6НМ64, расположенный на расстоянии 23 м от центра установки. В ходе проведения эксперимента использовались различные дополнительные детекторы и изменялось их расположение. Для измерения абсолютных потоков тепловых нейтронов мы использовали кристалл NaI размерами $\varnothing 8 \times 8 \text{ см}^2$, обладающий достаточно высокой эффективностью регистрации тепловых нейтронов, и два детектора (СДК-01) цилиндрической формы $\varnothing 63 \times 100 \text{ мм}^2$ на основе ZnS(Ag) в смеси с борсодержащим веществом, обогащенным изотопом ^{10}B (внутри монитора, вместо одного из пропорциональных борных счетчиков и снаружи монитора над его центром). Кроме того, над монитором были установлены 6 детекторов с обычными пластическими сцинтилляторами, размером $1 \times 1 \text{ м}^2$ и толщиной 5 см каждый. По показаниям установки Ковер определялись также все характеристики ШАЛ: возраст (s), мощность (N_e), положение оси ливня, число мюонов (N_μ) и проч.

На рис. 1 представлены результаты сравнения показаний двух детекторов, расположенных внутри нейтронного монитора, в одних и тех же событиях, а именно: стандартного пропорционального борного счетчика СНМ-15 (№3) и расположенного в соседней трубе (вместо счетчика №4) кристалла NaI, размером $\varnothing 8 \text{ см} \times 8 \text{ см}$, просматриваемого фотоумножителем.

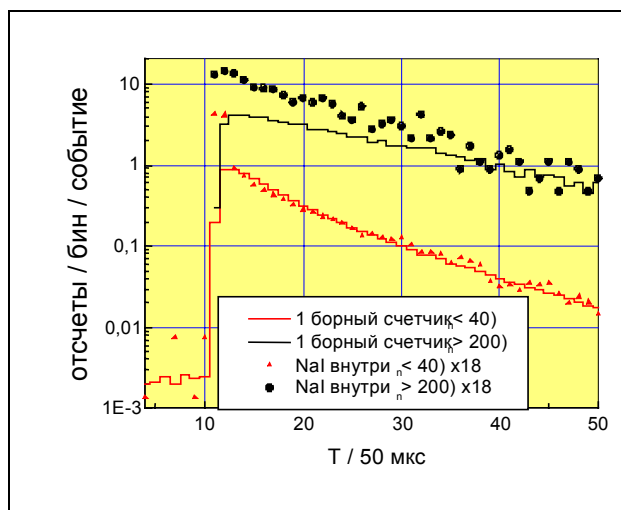


Рис. 1. Временные распределения задержанных импульсов, измеренные различными детекторами, в событиях с большой ($M_n > 200$) и малой ($M_n < 40$) кратностью зарегистрированных нейтронов.

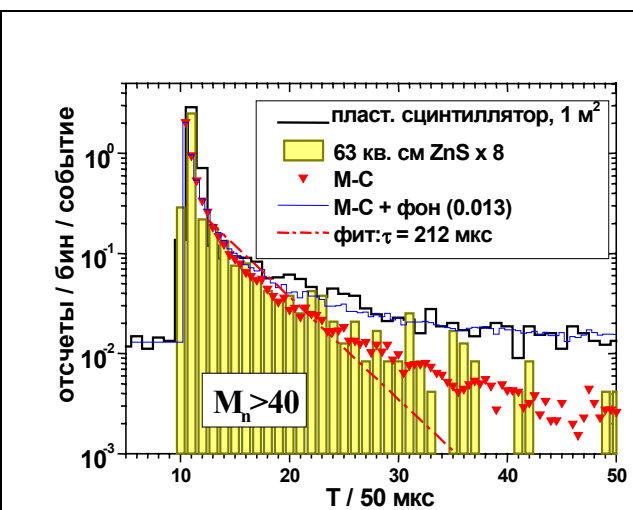


Рис.2. Временные распределения задержанных импульсов во внешних детекторах.

Показания сцинтилляционного детектора были в обоих случаях умножены на 18 для того, чтобы совместить их с данными борного счетчика. Как видно из рисунка, при малых кратностях нейтронов ($M_n < 40$), временные распределения практически совпадают, за исключением двух первых бинов после прохождения ШАЛ (10-й бин). Эту разницу можно объяснить тем, что NaI, в отличие от борных счетчиков, регистрирует в первые микросекунды гамма кванты, излучаемые при неупругом рассеянии нейтронов на ядрах во время замедления нейтронов. Поскольку начало бина не синхронизовано с прохождением ШАЛ, то возникает неопределенность ± 1 бин и превышение наблюдается не в одном, а в двух бинах. При больших кратностях ($M_n > 200$) распределение, измеренное борным счетчиком, становится заметно положе, что подтверждает факт насыщения последнего. Отсутствие выбросов в первых двух бинах в распределении для NaI при больших кратностях объясняется тем, что мертвое время используемого формирователя импульсов, равное 2.5 мкс, ограничивало количество отсчетов внутри интервала 50 мкс на уровне ~ 20 .

На рис. 2 показаны временные распределения задержанных импульсов во вспышках, наблюдаемые во внешних сцинтилляционных детекторах: в СДК-01 и в одном из пластиковых сцинтилляторов, площадью 1 кв. м. Показания СДК-

01 умножены на 8 для нормировки. Там же показаны, ожидаемые для данной геометрии эксперимента распределения, нормированные на эксперимент, полученные с помощью расчета дрейфа и захвата тепловых нейтронов в мониторе и в окружающем его веществе. Две расчетные кривые отличаются только тем, что к распределению, соответствующему пластическому сцинтиллятору, добавлен постоянный фон случайных совпадений, равный 0.013 в интервале 50 мкс. Поскольку собственный темп счета детектора СДК-01 низок, то для него фон случайных совпадений пренебрежимо мал.

За экспозицию 1.1 г., были отобраны для анализа мощные события с нейтронными вспышками с числом частиц в ШАЛ $N_e > 10^6$. Параметры этих событий приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры наиболее мощных ШАЛ ($N_e > 10^6$) с нейтронными вспышками за время экспозиции 1.1 г.

Мощность ливня $N_e/10^6$	Возраст ливня s	Мощность вспышки M_n	Поток внутри, $n/cm^2/c$	Поток вне, $n/cm^2/c$	$\rho_{\mu}(47m), m^{-2}$ (измеренная)	$\rho_{\mu}(47m), m^{-2}$ (истинная)
1.35±0.41	1.05±0.05	1876±368	1737±340	1525±8	0.78	1.5
2.26±0.56	0.95±0.05	3960±514	3667±477	3541±1	0.65	1.0
3.01±0.73	1.0±0.05	3096±472	2867±437	2908±1	0.80	1.6
3.36±0.85	1.0±0.05	2376±414	2200±383	2238±9	0.80	1.6

Как видно из таблицы, все отобранные по максимальной мощности ливни с полным числом электронов на уровне наблюдения $N_e > 10^6$, сопровождаются мощными нейтронными вспышками (M_n измерена СДК-01 и пересчитана к показаниям 6 борных счетчиков). Учитывая, что эффективность регистрации образующихся в НМ64 вторичных нейтронов составляет ~ 5% , можно оценить число образованных в мониторе (на площади всего 6 кв. м) испарительных нейтронов в таких вспышках как $\sim 10^5$. Эта, на первый взгляд огромная величина, при более детальном рассмотрении вполне объяснима. Дело в том, что эти нейтроны образуются в ядерных расщеплениях, а не в каскадном процессе. Для рождения одного испарительного нейтрона тратится энергия всего лишь порядка 10 МэВ, а не ~1 ГэВ, как в каскадном процессе. Таким

образом, на рождение (высвобождение) 10^5 нейтронов требуется всего лишь ~ 1 ТэВ энергии.

В Главе 3 описан проект установки «МультиКом» и пилотный эксперимент на ее прототипе. В 2001 г. нами был предложен проект компактной мультикомпонентной установки для изучения ШАЛ – «Мультиком». Поскольку данный проект находится вне рамок диссертации, то приводится лишь краткое его описание. Основной идеей, положенной в основу проекта, была мультикомпонентность, т. е. возможность регистрировать все компоненты ШАЛ (за исключением нейтрино) на одной установке, и низкий порог регистрации по первичной энергии. Важнейшей характеристикой установки является наличие сети сцинтилляционных детекторов для регистрации тепловых нейтронов, сопровождающих ШАЛ.

Предложенный проект был частично реализован в 2005 г. в виде действующего макета на установке Ковер-2 («Макет Мультиком» БНО ИЯИ РАН, 1700 м над уровнем моря), представляющего собой одну ячейку установки Мультиком и состоящего из 4 толстых жидкостных сцинтилляционных детекторов, расположенных в углах квадрата $5 \times 5 \text{ м}^2$ и одного детектора тепловых нейтронов, площадью 0.7 м^2 , расположенного в центре квадрата на высоте 2,5 м над полом (рис. 3). Детекторы электронной компоненты в данной работе использовались лишь для выработки триггера 4-кратных совпадений, тогда как основная работа велась с детектором тепловых нейтронов. Детектор (см. рис. 3) выполнен на основе светосостава СЛ6-5, представляющего собой гранулированный сплав кристаллов неорганического сцинтиллятора $\text{ZnS}(\text{Ag})$ и LiF , обогащенного до 90% изотопом ${}^6\text{Li}$. В отличие от детектора СДК-01 здесь используется реакция ${}^6\text{Li} + n \Rightarrow {}^3\text{H} + \alpha + 4.78 \text{ МэВ}$. Хотя сечение этой реакции (945 барн) примерно в 3 раза меньше, чем на ${}^{10}\text{B}$, зато энергия вторичных частиц, а значит и количество собираемого света почти в 2 раза выше. Регистрация аналоговых сигналов нейтронного детектора проводилась с помощью цифрового осциллографа, подключенного к

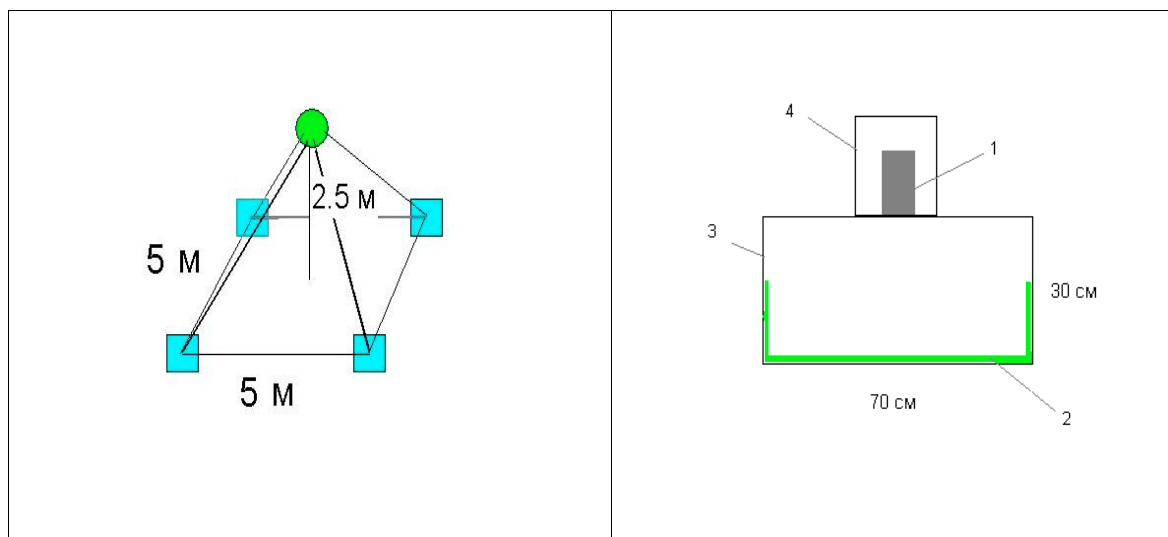


Рис. 3. Расположение детекторов в Макете Мультиком и конструкция нейтронного детектора. ■ - ливневые детекторы; ● - сцинтилляционный детектор тепловых нейтронов.

1 - ФЭУ-49; 2 – сцинтиллятор; 3 – корпус из дюралюминия; 4 – стальной светозащитный кожух.

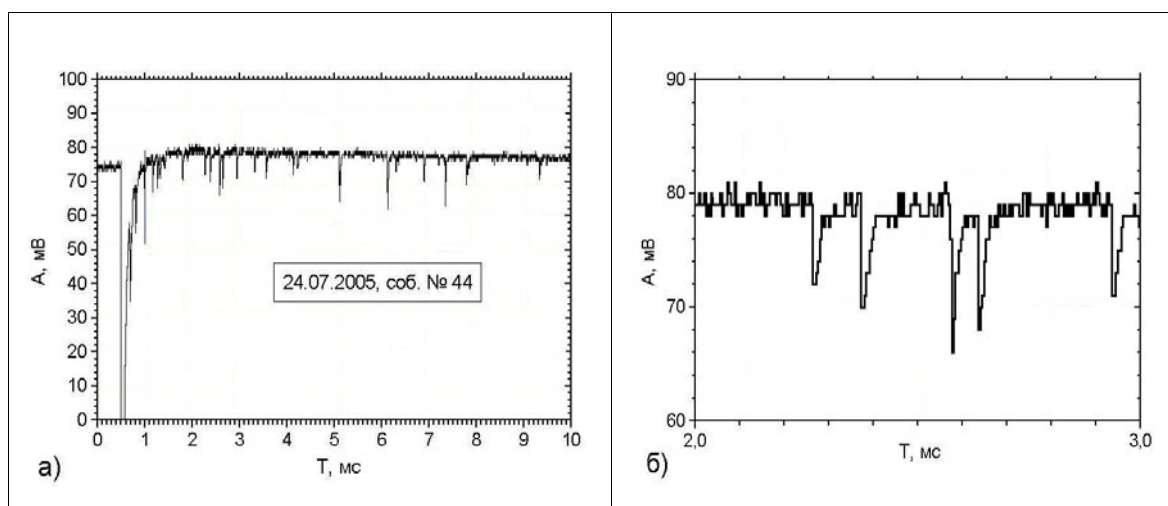


Рис. 4. Пример осциллограммы события типа “нейтронная вспышка”

а) вся осциллограмма; б) увеличенная деталь в интервале от 2.0 до 3.0 мс.

персональному компьютеру. Запуск осциллографа производился триггерным импульсом (момент прихода триггера соответствует $T_0=0.5$ мс) с частотой ~ 3.3 мин⁻¹. Длительность развертки была равна 10 мс, шаг оцифровки – 4 мкс, импульсы с анода ФЭУ проинтегрированы с постоянной времени ~ 8 мкс. На рис. 4 показан пример события с кратностью зарегистрированных нейтронов $M_n= 32$. Наш детектор слабо чувствителен к одиночным заряженным релятивистским частицам из-за очень тонкого слоя сцинтиллятора. Однако в случае ШАЛ ситуация меняется: при синхронном прохождении (за время

сцинтилляции $\tau \approx 40$ нс, либо за время интегрирования сигнала) многих частиц, сигналы от них складываются. Это означает, что амплитуду первого импульса, соответствующего прохождению ШАЛ (см. Рис. 4а), можно использовать для измерения локальной плотности частиц (ρ) и числа частиц (N_c) в ШАЛ.

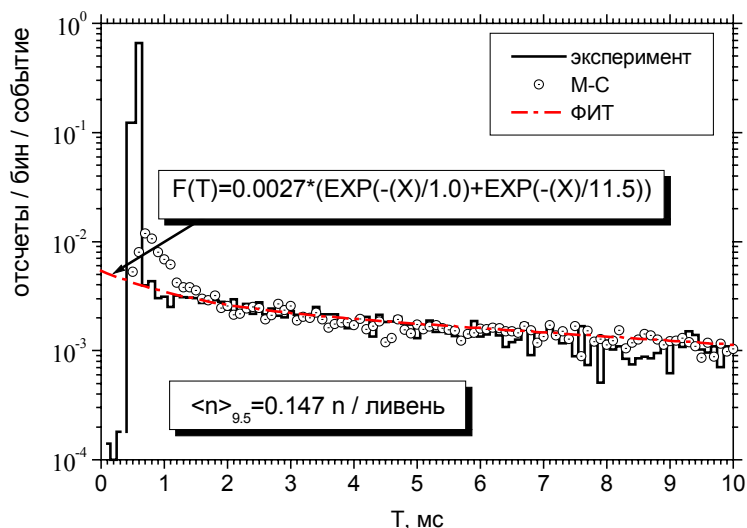


Рис. 5 . Временное распределение задержанных импульсов для всех событий в сравнении с математическим моделированием по программе CORSIKA.

Временное распределение задержанных импульсов, накопленное за 0.6 года “живого” времени, показано на рис. 5. Видно, что средняя вероятность появления импульсов в интервале 9.5 мс после прохождения ШАЛ заметно выше фона случайных совпадений и составляет 0.147 ± 0.005 , т. е. примерно 15% на одно событие (событием является наличие триггера 5-кратных совпадений: 4-кратных совпадений угловых детекторов плюс наличие импульса с амплитудой выше 8 мВ (~ 5 рел. частиц) в центральном детекторе). Темп счета таких событий составляет 0.14 мин^{-1} . В расчете на один ливневой триггер (3.3 мин^{-1}) вероятность регистрации нейтрона в интервале 9.5 мс составляет 0.043 ± 0.02 . Из рисунка видно, что время сбора тепловых нейтронов очень велико и их распределение фитируется двойным экспоненциальным распределением, показанным на графике. Там же приведены результаты математического моделирования эксперимента.

В эксперименте было получено интегральное распределение по локальной

плотности частиц ρ , показанное на рис. 6 для событий с зарегистрированными нейтронами и без нейтронов. Спектр всех событий имеет обычный для ШАЛ степенной вид с наклоном -1.5 . В событиях же с зарегистрированными нейтронами спектр не является степенным в измеренном диапазоне и более пологий. Доля событий с нейтронами растет с ростом плотности, а при плотности более 1000 м^{-2} их доля близка к 1.

Для того, чтобы проверить влияние триггерных условий на временные распределения регистрируемых нейтронов, была проведена серия измерений с периферическим триггером M1 установки “Ковер-2”, вырабатываемым при 5-кратных совпадениях удаленных детекторов. Результаты этих измерений приведены на рис. 7 в сравнении с измерениями по локальному триггеру M2 (от Макета Мультиком). Наиболее интересным здесь является нарастающее

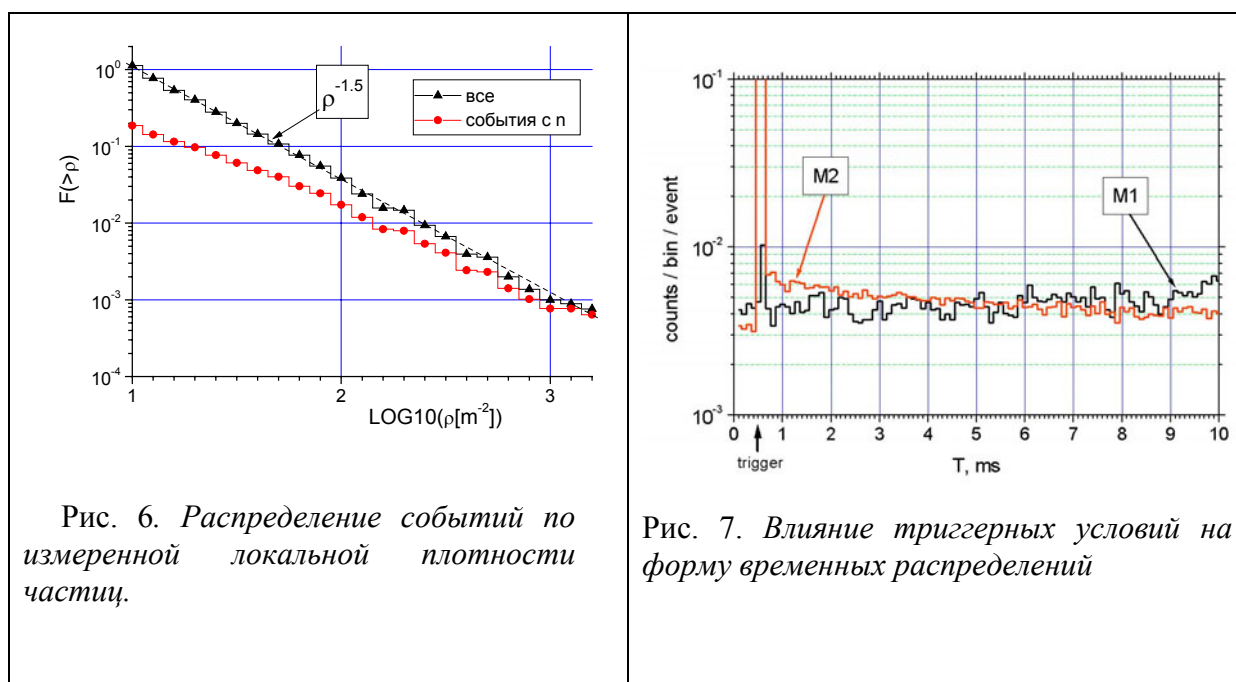


Рис. 6. Распределение событий по измеренной локальной плотности частиц.

Рис. 7. Влияние триггерных условий на форму временных распределений

(в интервале 10 мс) распределение, полученное по триггеру M1. При таком триггере практически отсутствуют локально-рожденные нейтроны, а регистрируются лишь атмосферные нейтроны, приходящие с больших расстояний.

В Главе 4 приведены результаты проведенных расчетов и анализ полученных результатов. В расчете была учтена реальная геометрия эксперимента с нейтронным монитором с учетом конструкции и всех основных веществ и их

нейтронных сечений как внутри монитора, так и вне его, с целью получения ожидаемых временных распределений задержанных импульсов, регистрируемых внутренними и внешними детекторами.

Предполагалось, что в процессе рассеяния, быстрые нейтроны успевают разойтись достаточно далеко от точки (точек) рождения и образующиеся тепловые нейтроны распределены равномерно по телу монитора и по расположенному под ним грунту, толщиной 1 м. Далее отслеживалась судьба каждого нейтрона. Расчет для нейтронного монитора начинался с того момента, когда нейтроны термализовались. Это существенно упростило расчет, т. к. для тепловых нейтронов рассеяние изотропно и известны сечения, как рассеяния, так и захвата на всех основных ядрах входящих в состав нейтронного монитора.

Аналогичный расчет был проведен и для эксперимента “Макет Мультиком” с учетом особенностей этого эксперимента. В этом эксперименте нет выделенного источника нейтронов, поэтому приходилось учитывать все окружающее детектор вещество в радиусе 300 метров.

С помощью программы CORSIKA (версия 6012, стандартная модель HDPM) были рассчитаны большие массивы искусственных ливней различной природы (p, He, Fe) и различных фиксированных энергий, а также разыгранных по спектру с показателем -2.7. Уровень наблюдения соответствовал уровню установки Ковер-2 на Баксанской нейтринной обсерватории (1700 м над уровнем моря), ограничения по зенитному углу были 0-30°. Затем эти ливни “бросались” на установку. Поскольку CORSIKA, как и любая другая подобная программа, не может отслеживать историю частиц вплоть до тепловых энергий, то по ней определялось только количество и энергия адронов высоких энергий ($E_h > 50$ МэВ) попавших в нейтронный монитор, при условии попадания оси ШАЛ в центр монитора. Далее использовалась известная эмпирическая формула для пересчета от энергии высокоэнергичного адрона к числу регистрируемых монитором нейтронов. Это позволило существенно упростить задачу и выполнить расчет. Для сравнения с экспериментом были выбраны 2

измеряемые величины: полное число электронов в ШАЛ (N_e) и число регистрируемых монитором тепловых нейтронов (M_n). Была вычислена зависимость $M_n(N_e)$ для различных первичных частиц (p, He и Fe) при условии, что ось ливня попадает в центр.

Для четырех мощнейших из зарегистрированных нейтронных вспышек (см. табл. 1) были вычислены M_n и N_e . На рис. 8 дано их сравнение с расчетными кривыми. Как можно видеть, согласие вполне удовлетворительное (точки лежат несколько ниже, поскольку в расчете предполагалось попадание оси ШАЛ строго в центр монитора).

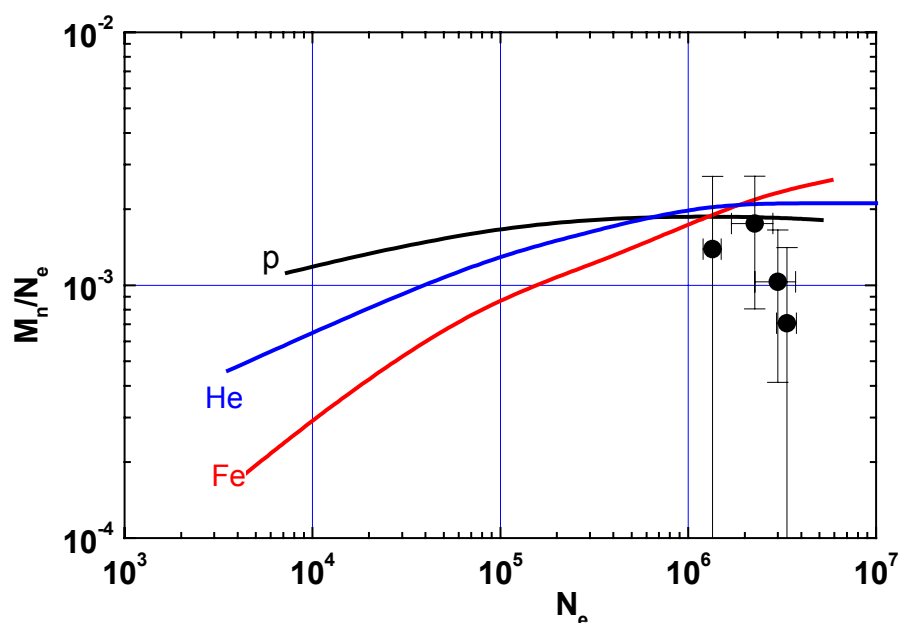


Рис. 8. Сравнение расчета с экспериментом на нейтронном мониторе для мощных нейтронных вспышек.

Из результатов расчетов, приведенных в данной главе, следует, что при проведении экспериментов по регистрации тепловых нейтронов, сопровождающих ШАЛ, следует проводить полномасштабное моделирование конкретного эксперимента методом Монте-Карло. Главный же вывод состоит в том, что все экспериментальные детали (естественно с разумными упрощениями) могут быть учтены в расчетах. Полученное нами приемлемое согласие полученных экспериментальных результатов с результатами проведенного математического моделирования нескольких экспериментов,

показывает, что компромисс между неизбежными упрощениями и точностью расчетов может быть найден.

В Главе 5 излагается новый подход к феноменологии ШАЛ с учетом полученных результатов измерений и расчетов.

Как известно, электронная компонента является вторичной, и представляет собой суперпозицию множества вторичных электромагнитных лавин производимых адронной компонентой за счет распадов нейтральных пионов (каонов), образующихся наряду с заряженными пионами (каонами) в адронных взаимодействиях. Это означает, что электромагнитная компонента находится в динамическом равновесии с постоянно подпитывающей ее первичной адронной компонентой. Именно поэтому свойства ШАЛ и их поглощение в атмосфере определяются адронной компонентой. Эта схема описана в учебниках и прекрасно иллюстрирует основные особенности развития ШАЛ на протяжении многих лет. Между тем, в ней содержится одна несущественная на первый взгляд неточность.

Что происходит с ливнем в той точке, когда количество высокоэнергичных адронов, подпитывающих электронную компоненту становится равным 1? Поскольку число частиц является дискретной величиной, то далее может быть только 0. Таким образом, эта точка является критической в развитии ливня. В ней нарушается равновесие между электромагнитной и адронной компонентами. Спрашивается, а как будут вести себя оставшиеся электроны, которых, как показывают расчеты, в этот момент еще огромное количество ($\sim 10^5$)? Естественно ожидать, что ливень будет далее развиваться по законам электромагнитного каскада. Свойства такого ливня, который мы назвали *бесствольным*, существенно отличаются от свойств обычного ливня точно в той же степени, в какой электромагнитный ливень отличается от адронного. Следует отметить, что бесствольный ливень – это не какая-то особая разновидность ливней, а конечная стадия развития всех адронных каскадов.

Итак, что же представляет собой явление, которое мы назвали “нейтронная вспышка”? Природа этого явления заключается в следующем: адроны ШАЛ,

достигшие уровня наблюдения, взаимодействуют с ядрами вещества детектора и окружающего его вещества, производя при этом множество вторичных (как правило, испарительных) нейтронов, с характерной энергией порядка несколько Мэв. Эти нейтроны замедляются в окружающем веществе, захватываются ядрами, производя сигналы в детекторах непосредственно (в нейтронных счетчиках), либо через (n, γ)-реакции (в детекторах заряженных частиц).

В работах по изучению данного явления отмечалось наличие энергетического порога для ШАЛ, сопровождаемых большими нейтронными вспышками. В рамках нашего подхода, это легко объяснимо. Мощные нейтронные вспышки регистрируются тогда, когда вблизи детектора рождается много локальных нейтронов. Это происходит при выполнении двух условий: 1) энергия первичной частицы в расчете на один нуклон достаточно высока, для того, чтобы адронный ствол ШАЛ дошел до уровня наблюдения и 2) ось ШАЛ прошла в пределах нескольких метров от детектора нейтронов (поскольку основная часть высокоэнергичных адронов сосредоточена в стволе ливня, радиусом около 1 м). Условие 1 выполняется при энергии ШАЛ выше 100 ТэВ/нуклон. При этом наибольшее относительное количество нейтронов (M_n/N_e) на уровне наблюдения будет регистрироваться при попадании в установку ствола ШАЛ, происходящего от первичного ядра железа с энергией выше 5 ПэВ.

Помимо количества нейтронов важно измерять также и временную структуру “нейтронного пара”, сопровождающего ШАЛ. Локальные и атмосферные нейтроны имеют различные временные распределения и могут быть разделены в эксперименте. Между тем, эти две компоненты несут различную информацию о ливне: количество локальных нейтронов в первом приближении пропорционально количеству высокоэнергичных адронов, прошедших вблизи детектора, а атмосферные нейтроны доносят информацию об адронах выше уровня наблюдения (вплоть до высоты ~ 1 км над установкой).

В Главе 6 приведено описание проекта установки PRISMA и установки «Нейтрон», являющейся ее прототипом.

Поскольку адроны являются основной компонентой ШАЛ, определяющей свойства ливня на уровне наблюдения и в наибольшей мере сохраняющей информацию о первичной частице, то именно адронная компонента должна изучаться в первую очередь. Использование для этой цели адронных калориметров в составе установок для изучения ШАЛ не может решить данной задачи по следующим причинам: 1) ограниченная регистрирующая площадь калориметров, 2) высокий порог регистрации адронов, 3) сложность и дороговизна такого прибора и, наконец, 4) слишком большой объем получаемой информации и неоднозначность ее интерпретации в случае множественной регистрации адронов (стволов ШАЛ).

Предлагаемый в данной работе новый метод регистрации адронной компоненты ШАЛ лишен всех указанных выше недостатков. В самом деле, установка, состоящая из большого числа однотипных и дешевых детекторов, может покрывать огромную площадь и иметь, таким образом, очень большую светосилу. Она будет чувствительна ко всем адронам попавшим на эту площадь вне зависимости от энергии последних (включая МэВные и даже тепловые нейтроны). Установка может быть очень простой и недорогой. Наконец, поскольку измеряются интегральные характеристики ШАЛ, то объем получаемой информации не велик и, что особенно важно, данный метод практически лишен ограничений по числу регистрируемых адронов в установке. Последнее объясняется тем, что эффективность регистрации тепловых нейтронов установкой мала (типа 1/1000), а широкие временные распределения регистрируемых нейтронов позволяют свести к минимуму просчеты, связанные с ограниченным быстродействием регистрирующей аппаратуры. Наносекундная временная шкала, характерная для распределения частиц внутри ливневого диска, “растягивается” для тепловых нейтронов до миллисекундной шкалы, т. е. в миллион раз.

Второй важнейшей компонентой ШАЛ, дающей интегральную по всей

каскадной кривой информацию о ливне, является мюонная компонента. В самом деле, мюоны слабо поглощаются в атмосфере и не участвуют в каскадном процессе. Количество мюонов, дошедших до уровня наблюдения, практически не зависит от других компонент на этом уровне и, поэтому, спектр ШАЛ по числу мюонов точнее передает информацию о первичном спектре. Пересчет от спектра ШАЛ по числу мюонов к спектру космических лучей является на наш взгляд более простым и адекватным. Отсюда следует простой вывод: вновь создаваемые установки по изучению ШАЛ должны иметь в своем составе большие мюонные детекторы и систему регистрации, позволяющую регистрировать большие мюонные ливни.

Наконец, установка должна регистрировать и электронную компоненту. Это необходимо, прежде всего, для “стыковки” с традиционными установками, для взаимной калибровки различных методов.

С учетом приведенных выше соображений нами был разработан и предложен проект большой экспериментальной установки нового типа для изучения спектра космических лучей методом ШАЛ. Главная цель проекта - решение проблемы наблюдаемого излома в спектре космических лучей.

Другим важным преимуществом такой установки является возможность локализации оси ливня по адронной компоненте (наряду с традиционным способом), что должно обеспечить большую точность измерений для ливней имеющих адронный ствол, поскольку адроны имеют более крутое радиальное распределение, чем электроны. Это, в свою очередь, повысит точность определения энергии первичной частицы.

Использование n/e -соотношения, вместо традиционного μ/e -отношения, для определения типа первичной частицы (А), также должно дать лучший результат, поскольку число генерируемых в адронном ливне нейтронов (n) много больше числа мюонов (μ) и это отношение, кроме того, испытывает меньшие флуктуации, т. к. эти компоненты находятся в равновесии на уровне наблюдения (при условии, что адроны достигли этого уровня). Наконец, неоспоримым преимуществом данной установки является ее простота и

дешевизна стартового варианта с возможностью неограниченного расширения. Все это позволяет создать конкурентоспособную установку с минимальными затратами.

Основным детектором установки будет разработанный нами большой сцинтилляционный детектор тепловых нейтронов на основе светосостава $\text{ZnS(Ag)+}^6\text{LiF}$. Помимо адронной компоненты (нейтронов) эти же детекторы (эн-детекторы) будут использоваться и для регистрации электронной компоненты. Точно такие же по конструкции детекторы, но с другим сцинтиллятором, будут использованы для регистрации и изучения мюонной компоненты ШАЛ. Таким образом, вся установка будет состоять из однотипных детекторов, что значительно упрощает и удешевляет ее создание.

Созданные ранее установки для решения проблемы излома, несмотря на полученные интересные результаты, проблему не решили. Более того, она стала еще более запутанной, поскольку участники эксперимента KASCADE утверждают, что наблюдаемый излом в области нескольких ПэВ связан с укрупнением спектра протонов, тогда как коллаборация Tibet AS γ связывает этот излом с ядрами железа. Предлагаемый проект PRISMA (PPimary Spectrum Measurement Array), призван решить данную проблему. План установки показан на рис. 9. Полное количество детекторов в минимальном варианте равно 2141, размеры установки – $300 \times 300 \text{ м}^2$. Центральная часть установки, размером $100 \times 100 \text{ м}^2$, представляет собой ковер (сеть) из 441 эн-детекторов, площадью $\sim 1 \text{ м}^2$ каждый, расположенных в виде равномерной прямоугольной сети с шагом 5 м. Под ней будет располагаться большой центральный мюонный детектор, площадью 400 м^2 . Установка будет иметь следующие основные параметры:

- диапазон первичных энергий: 30 ТэВ – 30 ПэВ;
- число событий с $E_0 > 3 \text{ ПэВ}$ с осями внутри центрального “ковра”:
 $\sim 10000/\text{год}$;

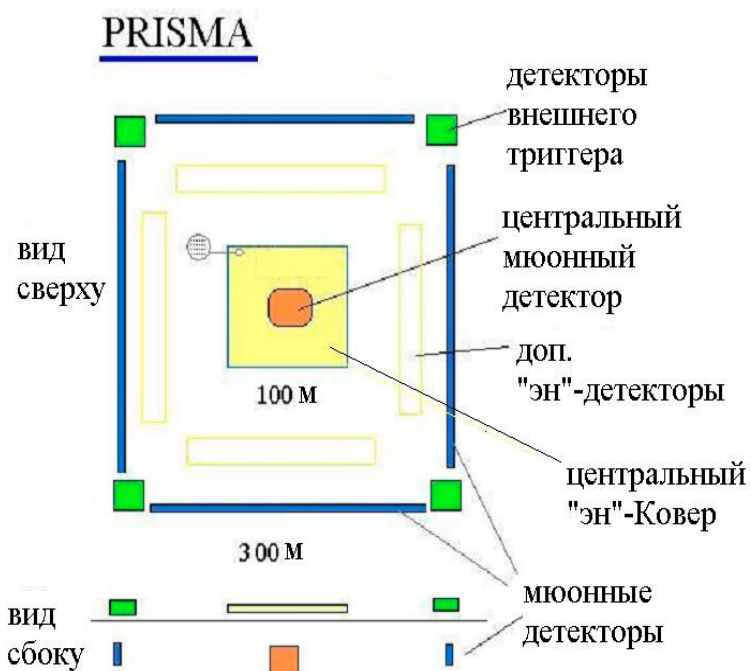


Рис. 9. План установки PRISMA.

- энергетическое разрешение: $\sim 10\%$;
- угловое разрешение $\sim 1.5^\circ$;
- точность локации оси: ~ 2.0 м.

Отметим, что если изучение “мюонных ливней” проводилось и проводится на ряде установок, то “адронные ливни” никогда не регистрировались и не изучались из-за ограниченной регистрирующей площади адронных калориметров и трудностей с интерпретацией событий с большой множественностью зарегистрированных адронов. В предлагаемом же эксперименте площадь, «просматриваемая» нейтронными детекторами, ничем принципиально не ограничена (1 га в минимальном варианте) и всегда может быть увеличена путем добавления стандартных нейтронных детекторов.

С целью апробации и отладки предложенной методики регистрации ШАЛ, на базе НОЦ «НЕВОД» (МИФИ) была создана (в рамках сотрудничества с МИФИ) установка «Нейтрон», являющаяся прототипом будущей установки PRISMA. Установка состоит из 5 эн-детекторов площадью 0.75 м^2 каждый, расположенных в углах и в центре квадрата со стороной 5 м. Триггер вырабатывается при совпадении в интервале 2 мкс срабатываний любых двух

детекторов с порогом 5 рел. частиц. Временные ворота для регистрации нейтронов в этом эксперименте расширены до 100 мс. На рис. 10 показаны пример мощного события с временным распределением нейтронов в каждом из детекторов (d1-d5) и полученные за 0.6 г. усредненные временные распределения для суммы 5 детекторов в событиях различной мощности: с управлением от 2х-, 3х- и 4х-кратных совпадений из 5 детекторов с энерговыделением выше 5 частиц (M1, M2 и M3 соответственно). Наблюдаемые временные распределения хорошо фитируются двойной

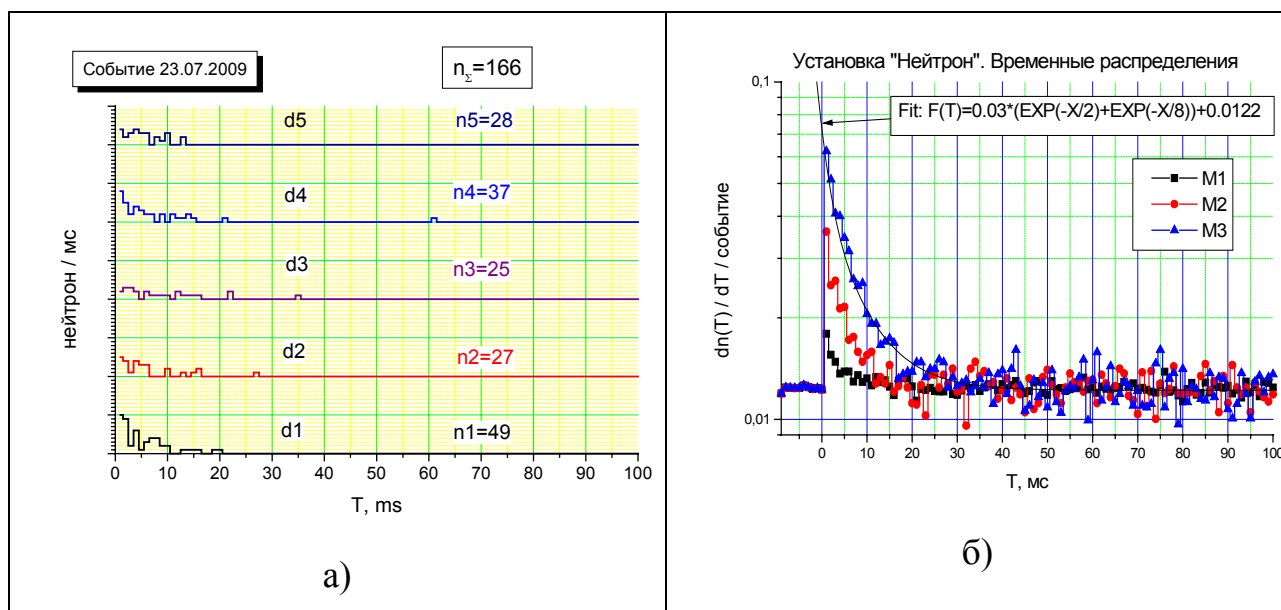


Рис. 10. Пример мощного события со 166 зарегистрированными в 5 детекторах нейтронами (а) и временные распределения регистрируемых нейтронов в зависимости от мощности ШАЛ(б).

экспонентой и находятся в удовлетворительном согласии, как с расчетом, так и с аналогичными распределениями, полученными нами ранее на установке «Макет Мультиком», если учесть, что условия проведения двух экспериментов и измеряемый диапазон задержек, существенно различны. Полученные нами предварительные результаты подтверждают, что метод работоспособен и создание современной конкурентоспособной установки нового типа вполне реально.

В заключении приведены основные результаты работы.

1. Создан большой сцинтилляционный детектор тепловых нейтронов на основе компаунда $ZnS(Ag)+^6LiF$, который может использоваться как для создания

больших установок нового типа по изучению космических лучей, так и для изучения долговременных вариаций фоновых потоков тепловых нейтронов. Достаточно высокая эффективность регистрации тепловых нейтронов (~20%) при средней толщине регистрирующего слоя всего 30 мг/см^2 и огромное количество излучаемого сцинтиллятором света (~160000 фотонов/захват) при приемлемом быстродействии (~40 нс), делают этот детектор очень удобным и универсальным инструментом для решения поставленной задачи. Помимо адронной компоненты (нейтронов) эти же детекторы (эн-детекторы) могут также использоваться и для регистрации электронной компоненты ШАЛ.

2. Проведены эксперименты на нейтронных мониторах в Мексике и в БНО ИЯИ РАН показавшие что:

- Наблюдавшиеся в экспериментах с нейтронными мониторами события типа *нейтронная вспышка* представляют собой случаи регистрации ШАЛ большой мощности с адронным стволом, прошедшим через монитор либо в нескольких метрах от него и для их объяснения не требуется привлечения каких-либо экзотических процессов.
- Газовые счетчики как гейгеровские, так и пропорциональные, не пригодны для использования в подобных экспериментах из-за их плохого быстродействия.
- С помощью сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов можно измерять абсолютные потоки нейтронов в событиях типа «нейтронная вспышка».
- Полное математическое моделирование проведенных экспериментов, с учетом их специфики, геометрии установок и химического (изотопного) состава детекторов и окружающего вещества, а также процессов замедления рождающихся вторичных (испарительных) нейтронов, удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

3. Разработан новый метод изучения адронной компоненты ШАЛ с помощью регистрации производимых ей вторичных нейтронов.

- Показано что, регистрируя тепловые нейтроны с большой площади сетью расположенных над землей открытых нейтронных счетчиков, можно на относительно простой, компактной и дешевой установке получить совершенно новую, никогда ранее не использовавшуюся информацию. При этом может быть решена та же задача, которая обычно решается с помощью гигантских и дорогостоящих адронных калориметров в составе установок для изучения ШАЛ.
- На этой основе разработан проект установки нового типа (проект PRISMA) с упором на регистрацию адронной компоненты ШАЛ. Целью проекта является решение проблемы наблюдаемого излома в спектре мощностей ШАЛ по числу частиц.
- Проект PRISMA имеет следующие преимущества перед традиционными установками:
 - ◆ площадь адронной части установки уже в стартовом варианте составляет 10^4 м^2 , что в 31 раз больше самого крупного (установка KASCADE) из используемых обычно для этих целей адронных калориметров и может быть расширена путем добавления новых детекторов;
 - ◆ отсутствуют трудности с интерпретацией мощных событий, вызванных множественным прохождением адронов (стволов ШАЛ);
 - ◆ динамический диапазон по числу регистрируемых нейтронов (адронов) практически не имеет ограничений, поскольку время собирания тепловых нейтронов (“нейтронного пара”) составляет десятки или даже сотни миллисекунд, при быстроедействии детекторов $\sim 100 \text{ нс}$;
 - ◆ точность локации оси ливня, благодаря малому расстоянию между соседними детекторами и более крутому пространственному распределению адронов по сравнению с электронами, составляет 1-2 м;
 - ◆ повышенная точность определения массового состава первичных частиц, благодаря использованию n/e и n/μ соотношениям, наряду с традиционным μ/e отношением;
 - ◆ возможность использования одних и тех же детекторов для регистрации

двух основных компонент ШАЛ, что делает проект еще более дешевым и конкурентоспособным.

- В ходе выполнения работы автором была предложена в 2003 г. гипотеза феноменологического объяснения наблюдаемого излома в спектре мощностей ШАЛ: нарушением равновесия между компонентами ливня в момент, когда последний высокоэнергичный адрон теряет свою энергию или распадается и ливень становится *бесствольным*. В результате, на этой стадии продольного развития ливня меняется его затухание и, как следствие, появляется излом в спектре ШАЛ по числу частиц.
 - Показано, что в результате перехода с ростом энергии ШАЛ от бесствольных ливней к нормальным, появление адронов на уровне наблюдения имеет пороговый эффект (при достижении энергий выше ~ 100 ТэВ/нуклон) и, поэтому, появление нейтронных вспышек на уровне наблюдения также проявляет “пороговость”.
4. Созданы два прототипа установки нового типа для изучения ШАЛ: установка «Макет Мультиком» на БНО ИЯИ РАН и установка «Нейтрон» (МИФИ, Москва). Эксперименты, проведенные с помощью действующих прототипов предлагаемой установки, подтвердили работоспособность данного метода изучения ШАЛ и его перспективность. На прототипах были измерены: выход нейтронов из грунта при регистрации ШАЛ и временные распределения нейтронной компоненты ШАЛ, показывающие, что параметры этих распределений слабо зависят от высоты установки над уровнем моря.

Показано, что регистрируемые такой установкой нейтроны происходят из двух различных источников: *локальные* нейтроны, рожденные в непосредственной близости от детектора и *атмосферные* нейтроны, рожденные в атмосфере. Атмосферные и локальные нейтроны могут быть разделены экспериментально.

Список основных публикаций по теме диссертации

1. Yu.V. Stenkin, J.F. Valdes-Galicia, A. Hurtado and O. Musalem / Study of "neutron bursts" with Mexico City neutron monitor. // *Astroparticle Phys.*, v. 16(2), (2001), p. 157-168.
2. D.D. Djappuev, A.S. Lidvansky, V.B. Petkov and Yu.V. Stenkin. /Compact multicomponent array for EAS study (MULTICOM).// *Proc. of 27th ICRC, Hamburg*, (2001), p. 822-855.
3. Yu.V. Stenkin & J.F. Valdes-Galicia. / Neutron bursts in EAS: New physics or nuclear physics? // *Proc. of the 27th ICRC. Hamburg.* (2001). P. 1453-1456.
4. Yu.V. Stenkin & J.F. Valdes-Galicia. /On the neutron bursts origin.// *Mod. Phys. Letters A*, 17, No 26, (2002), p. 1745-1751.
5. Ю.В. Стенькин, В.Н. Бакатанов, Д.Д. Джаппуев и др. /Основные характеристики ШАЛ, производящих нейтронные вспышки. // *Известия РАН, сер. Физич.*, т. 66, № 11, (2002), с. 1575-1577.
6. Yu.V. Stenkin. /Does the "knee" in primary cosmic ray spectrum exist? // *Mod. Phys. Lett. A*, 18, No 18, (2003), p. 1225-1234.
7. Ю.В. Стенькин, А.Л. Цябук. / Спектры кратностей мюонов под землей и первичный спектр космического излучения. // *Известия РАН, сер. Физ.*, т. 68, №11, (2004), с. 1618-1620.
8. Ю.В. Стенькин, А.Б. Черняев, Д.Д. Джаппуев, А.У. Куджаев, О.И. Михайлова. /Экспериментальное наблюдение бесствольных ШАЛ. // *Известия РАН, сер. Физ.*, **68**, №11, (2004), с. 1611-1614.
9. Yuri V. Stenkin. /Remarks on astrophysical origin of the knee in cosmic ray spectrum. // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*, (2006), 151, p. 65-68.
10. Ю.В. Стенькин, Д.Д. Джаппуев, Х.Ф. Вальдес-Галисия. / Нейтроны в широких атмосферных ливнях. // *ЯФ*, т. 70, №6, (2007), с. 1123-1135.
11. Д.Д. Джаппуев, В.В. Алексеенко, В.И. Волченко. ..., Ю.В. Стенькин и др. / Модернизация установки «Ковер-2» БНО ИЯИ РАН. // *Известия РАН, сер. Физ.*, т. 71, №4, (2007), с. 542-544.

12. Ю.В. Стенькин, В.И. Волченко, Д.Д. Джаппуев, А.У. Куджаев, О.И. Михайлова. /Нейтроны в ШАЛ. // Известия РАН, сер. Физ., т. 71, №4, (2007), с. 558-561.
13. В.В. Алексеенко, Д.Д. Джаппуев, В.А. Козяревский, А.У. Куджаев, В.В. Кузьминов, О.И. Михайлова, Ю.В. Стенькин. /Анализ вариаций потока тепловых нейтронов на уровне 1700 м над уровнем моря. // Известия РАН, сер. Физ., т.71, №7, (2007), с. 1080-1083.
14. Ю.В. Стенькин. / Об особенностях продольного развития ШАЛ и о спектре космических лучей. // ЯФ, т.71, №1, (2008), с. 99-111.
15. Yu.V. Stenkin./ Thermal neutrons in EAS: a new dimension in EAS study. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl), v. 175-176, (2008), p. 326-329.
16. Ю.В. Стенькин, В.В. Алексеенко, В.И. Волченко и др. / Как выглядит ШАЛ в тепловых нейтронах? // Изв. РАН, серия физ., т. 73, №5, (2009), с. 647-649.
17. Yu. Stenkin. /On the PRISMA project. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), v. 196, (2009), p. 293-296.
18. Д.М. Громушкин, В.В. Алексеенко, А.А. Петрухин, Ю.В. Стенькин, И.И. Яшин. / Регистрация потока тепловых нейтронов вблизи поверхности Земли. // Изв. РАН. Серия физич., т. 73, №3, (2009), с. 425-427.
19. В.В. Алексеенко, Ю.М. Гаврилюк, Д.М. Громушкин, Д.Д. Джаппуев, А.У. Куджаев, В.В. Кузьминов, О.И. Михайлова, Ю.В. Стенькин, В.И. Степанов. /Связь вариаций потока тепловых нейтронов из земной коры с лунными периодами и сейсмической активностью. // Физика Земли. Т. 45. №8, (2009), с. 91-100.
20. Д.Д. Джаппуев, А.У. Куджаев, В.В.Алексеенко, Н.Ф. Клименко, А.С. Лидванский, Ю.В. Стенькин, В.Б. Петков, А.Б. Черняев, А.Л. Цябук. /Изучение мюонной и адронной компонент ШАЛ на установке Ковер-2. // Изв. РАН. Сер. физич., т. 73, №5, (2009), с. 642-644.
21. V.V. Alekseenko, Yu. M. Gavriluk, V.V. Kuzminov and Yu.V. Stenkin./ Tidal effect in the radon-due neutron flux from the Earth's crust. // J. Phys.: Conf. Ser. V. 203(1), (2010), p. 012045.