

На правах рукописи

ЩЕГОЛЕВ
Олег Борисович

**Изучение адронной компоненты
широких атмосферных ливней
методом регистрации
тепловых нейтронов**

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2016

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

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела лептонов высоких энергий и нейтринной астрофизики ИЯИ РАН **Стенькин Юрий Васильевич**.

Официальные оппоненты:

Галкин Владимир Игоревич, доктор физико-математических наук, доцент, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, профессор кафедры физики космоса.

Янке Виктор Гугович, кандидат физико-математических наук, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, заведующий отделом космических лучей.

Ведущая организация:

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

Защита состоится _____ в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 002.119.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) по адресу: 117312, г. Москва, проспект 60-летия Октября, дом 7а.

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

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.119.01
доктор физико-математических наук

С. В. Троицкий

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Исследования широких атмосферных ливней начались в опытах Скобельцына и Оже в 30-х годах прошлого века. Начиная с 50-х годов, изучение ШАЛ уже проводилось систематически, для этой задачи создавались различные установки. Работа в этой области продолжается и сейчас. При этом большая часть установок измеряла и измеряет электромагнитную компоненту ливня, некоторые установки включают в себя также мюонные и, иногда, черенковские детекторы. И лишь несколько установок по изучению ШАЛ за всю историю способны были регистрировать адронную компоненту ливня. В их числе установка на Тянь-Шане, установка EAS-TOP в Италии и установка KASCADE в Германии. Все эти установки для регистрации адронной компоненты ливня использовали ионизационные калориметры различной плотности. Площадь самого большого (в Карлсруэ) составила 320 м^2 . К настоящему времени ни один из указанных адронных калориметров уже не работает.

В 2001 году Ю. В. Стенькиным была предложена идея регистрации вторичных нейтронов ШАЛ при помощи недорогих, простых в устройстве сцинтилляционных детекторов. Основная масса вторичных нейтронов создается адронами ШАЛ в ядерных расщеплениях при взаимодействии с окружающим веществом, прежде всего с грунтом, бетоном. Поэтому число вторичных нейтронов генетически связано с числом адронов в ливне дошедших до уровня наблюдения и находится в равновесии с ним. Таким образом, регистрация вторичных испарительных нейтронов позволяет регистрировать и изучать адронную компоненту ШАЛ. Неоспоримым преимуществом такого метода является возможность создания недорогой установки с площадью в десятки и в сотни раз превышающей пло-

щадь существующих ионизационных калориметров и нейтронных мониторов. На сегодняшний день уже созданы и функционируют два прототипа такой установки: PRISMA-32 на базе НОЦ НЕВОД в МИФИ и PRISMA-YBJ на Тибете, первый из которых расположен на уровне моря, а второй на высоте 4300 м. Недавно закончилось создание аналогичной установки УРАН в НОЦ НЕВОД и в ближайшее время начнется создание полномасштабной установки PRISMA-LHAASO на Тибете.

В диссертации проведена обработка экспериментальных данных, полученных на прототипах, находящихся на разных уровнях наблюдения, а также результаты подробного моделирования экспериментов с использованием пакетов GEANT4.10 и CORSIKA6.9.

Цель работы

Участие в создании установок-прототипов проекта PRISMA на разных высотах. Проведение моделирования экспериментов PRISMA-32 и PRISMA-YBJ с использованием пакетов программ CORSIKA6.9 и GEANT4.10. Получение и анализ спектра широких атмосферных ливней по числу вторичных тепловых нейтронов и функции пространственного распределения тепловых нейтронов в ШАЛ по результатам двух экспериментов на различных уровнях наблюдения и сравнение с результатами моделирования. Изучение фона тепловых нейтронов в местах проведения экспериментов.

Научная новизна

- С помощью созданных установок впервые измерены функции пространственного распределения тепловых нейтронов в ШАЛ на уровне моря и на высоте 4300 м над уровнем моря.
- Путем моделирования показана генетическая связь между регистрируемыми тепловыми нейтронами и адронами ШАЛ.
- Впервые измерен спектр ШАЛ по числу вторичных тепловых нейтронов на двух уровнях наблюдения.

- Впервые получены экспериментальные данные по вариациям фоновых потоков тепловых нейтронов в различных географических и геологических условиях.

Практическая значимость

Созданные прототипы впервые реализовали идею одновременной регистрации электромагнитной и нейтронной компонент ШАЛ по всей площади установки одними и теми же детекторами. Обоснована возможность изучения адронной компоненты посредством регистрации вторичных тепловых нейтронов. Опыт, полученный при создании прототипов, их эксплуатации и моделировании, будет использован при создании полномасштабной установки PRISMA-LHAASO на Тибете. Проведенные исследования фона тепловых нейтронов создают базу для дальнейших исследований в области геофизики с помощью эн-детекторов.

Личный вклад автора

Автор внес весомый вклад в создание прототипов установки нового типа по изучению спектра космических лучей и их химического состава методом регистрации вторичных тепловых нейтронов ШАЛ: участвовал в сборке детекторов и разработке программного обеспечения для них, принимал участие в подготовке и проведении экспериментов (PRISMA-32 и PRISMA-YBJ), провел моделирование существующих прототипов с использованием пакетов GEANT4.10 и CORSIKA6.9, провел обработку и анализ экспериментальных данных, полученных на установках.

Положения выносимые на защиту

1. Результаты проведенного с использованием пакетов CORSIKA6.9 и GEANT4.10 моделирования экспериментов PRISMA-32 и PRISMA-YBJ.
2. Полученные экспериментально и в моделировании функции про-

пространственного распределения электромагнитной компоненты ШАЛ.

1. Полученные экспериментально и в моделировании функции пространственного распределения тепловых нейтронов, сопровождающих ШАЛ.
2. Полученные экспериментально и в моделировании спектры ШАЛ по числу тепловых нейтронов.
3. Результаты исследования фона тепловых нейтронов вблизи поверхности Земли как на уровне моря, так и в условиях высокогорья: сезонную и суточную волны в нейтронном потоке.

Апробация

Результаты работы были доложены на российских и международных конференциях: 33-й Всероссийской конференции по космическим лучам, 18-м Международном симпозиуме ISVNECRI-2014, 14-й Международной конференции TAUP-2015, а также на научных семинарах им. Г.Т. Зацепина.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 работ, из которых 4 в рецензируемых научных изданиях

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, содержит 115 страниц машинописного текста, в том числе 62 рисунка, 4 таблицы и список литературы из 68 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлен краткий исторический обзор экспериментов по изучению широких атмосферных ливней, а также отдельно указаны эксперименты, нацеленные на изучение адронной компоненты ШАЛ и имевшие в своем составе адронные калори-

метры. Наиболее крупным из таких экспериментов была установка KASCADE, работавшая в Карлсруэ на высоте близкой к уровню моря и включавшая в себя ионизационный калориметр площадью 320 м^2 и плотностью 1460 г/см^2 . За время работы калориметра были получены спектры ШАЛ по числу высокоэнергичных адронов для разных пороговых энергий адронов, которые хорошо описываются степенными зависимостями с показателем 1.9–2.0 для интегрального спектра. Полученные спектры показаны на рис. 1.

Также во введении приводится общее описание разработанного в ИЯИ РАН метода изучения адронной компоненты ШАЛ с помощью регистрации вторичных тепловых нейтронов, рожденных

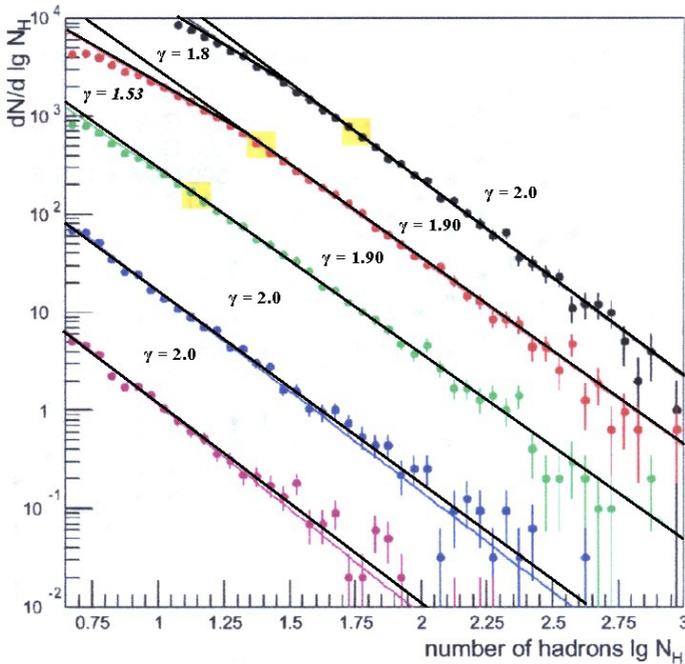
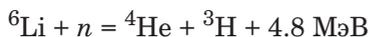


Рис. 1. Спектры ШАЛ по числу адронов, полученные экспериментально на калориметре KASCADE и опубликованные в 2001 году. Закрашенные разными цветами — различные пороги по энергии адронов: от 50 ГэВ до 1 ТэВ

адронами ШАЛ в веществе окружающем установку и замедлившихся до тепловых энергий.

В **первой главе** приводится подробное описание электрон-нейтронного детектора (эн-детектора), способного совместно регистрировать электромагнитную компоненту атмосферного ливня и задержанные тепловые нейтроны. Первоначально в основе детектора лежал светосостав из сцинтиллятора ZnS(Ag) и соединения LiF, в котором Li был обогащен изотопом ${}^6\text{Li}$ до 90%. Тепловые нейтроны захватываются ${}^6\text{Li}$, образуется возбужденное ядро, которое распадается на тритон и альфа-частицу с выделением большого количества энергии. Данная реакция показана ниже:



Образовавшиеся тяжелые заряженные частицы теряют свою энергию в ZnS(Ag) и дают большой сигнал. На основе данного светосостава изготовлены эн-детекторы установок PRISMA-32 и PRISMA-YBJ.

На сегодняшний день вместо литиевого светосостава используется светосостав на основе соединения натурального бора, в котором содержится $\approx 20\%$ изотопа ${}^{10}\text{B}$. Стоимость такого сцинтиллятора значительно ниже, чем у литиевого. Реакция взаимодействия нейтрона с ${}^{10}\text{B}$:



На основе данного сцинтиллятора изготовлены эн-детекторы установки УРАН, а также планируется его использование в установке PRISMA-LHAASO.

В главе 1 также приводится описание импульсов с эн-детектора, методики отбора нейтронных импульсов по форме, а также показаны оцифрованные сигналы с эн-детектора при прохождении атмосферного ливня.

Во **второй главе** подробно описывается проект эксперимента PRISMA, история его развития, а также существующие прототипы эксперимента, установки PRISMA-32 и PRISMA-YBJ, расположенные в Москве и на Тибете. В главе приводится описание системы регистрации ШАЛ экспериментов, приводятся примеры зарегистрированных событий.

В **третьей главе** изложена методика обработки результатов измерений, приводятся основные полученные результаты. По результатам работы получены функции пространственного распределения электромагнитной компоненты ШАЛ и вторичных тепловых нейтронов. Получено распределение ШАЛ по числу нейтронов для высот 170 м и 4300 м над уровнем моря. Данное распределение в обоих случаях хорошо описывается степенной функцией с показателем 1.95 ± 0.05 для интегрального спектра.

В **четвертой главе** описывается моделирование экспериментов PRISMA-32 и PRISMA-YBJ, проведенное с использованием пакетов CORSIKA6.9 и GEANT4.10. Моделирование проводилось для первичных протонов и ядер железа. При помощи моделирования методом Монте-Карло была получена зависимость числа нейтронов, рождаемых адронами ШАЛ в веществе окружающем детектор (в основном в грунте) от энергии адрона. Данная зависимость хорошо описывается степенной функцией с показателем 0.36. Проведено сравнение полученного результата с результатами подобного моделирования из справочника (Барашенков, Тонеев), а также с экспериментальными данными полученными в Лидсе на нейтронном мониторе (Hatton), установленном под магнитным спектрометром. Данные показаны на рис. 2.

Также при помощи GEANT4 были получены функции пространственного распределения нейтронов относительно траекторий «родительских» адронов. Они приведены на рис. 3. Показано влияние крыши на ФПР нейтронов.

Путем моделирования с использованием CORSIKA и GEANT4

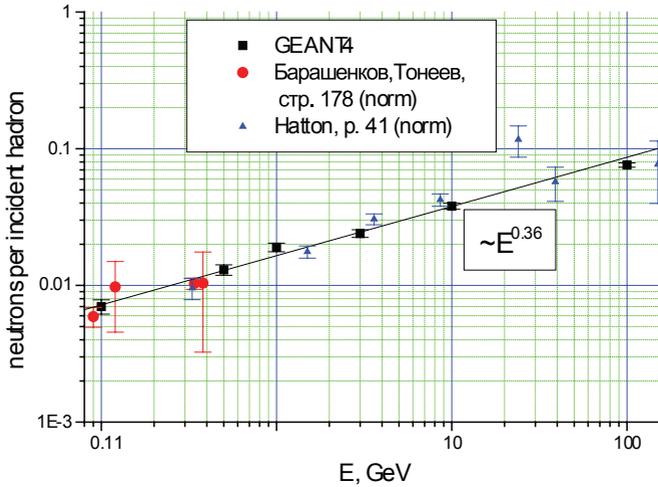


Рис. 2. Зависимость числа зарегистрированных тепловых нейтронов от энергии адрона:

черные квадраты — по результатам моделирования в GEANT4.10; красные точки — моделирование для протонов из работы [Барашенков, Тонеев] (точки нормированы) синие треугольники — экспериментальная работа на нейтронном мониторе с магнитным спектрометром из работы [Hatton] (точки нормированы)

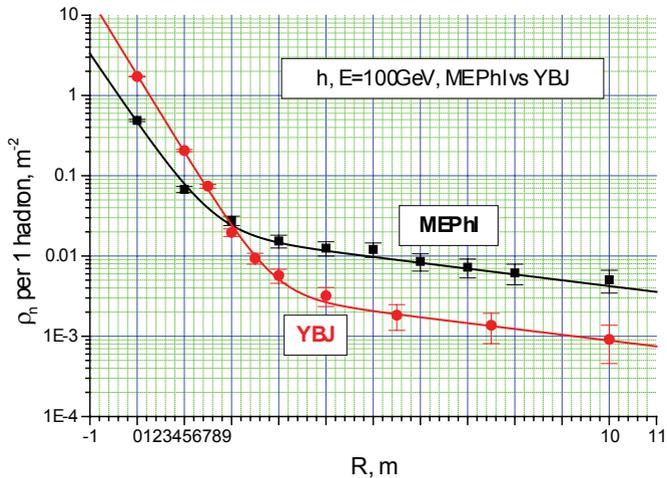


Рис.3. Зависимость числа зарегистрированных тепловых нейтронов от расстояния до падающего адрона (по результатам моделирования в GEANT4.10 для адронов с энергией 100 ГэВ):

черные квадраты — моделирование для Москвы; красные точки — моделирование для Тибета

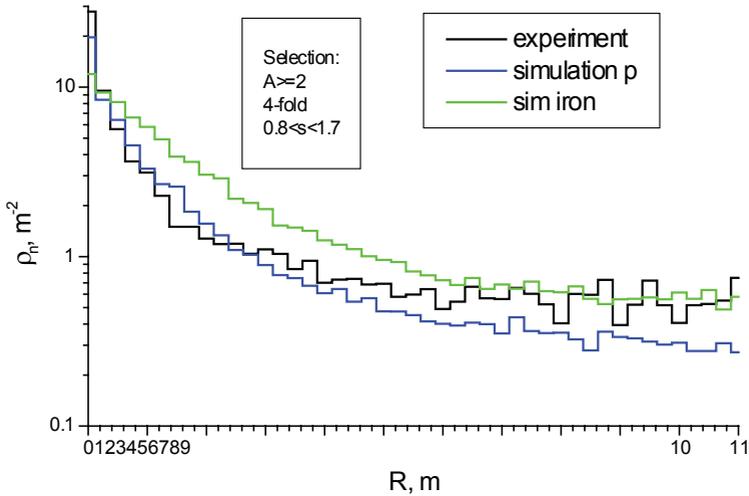


Рис. 4. ФПР тепловых нейтронов в ШАЛ для установки PRISMA-YBJ: черная гистограмма — экспериментальные точки; синяя гистограмма — моделирование для протонов; зеленая гистограмма — моделирование для железа

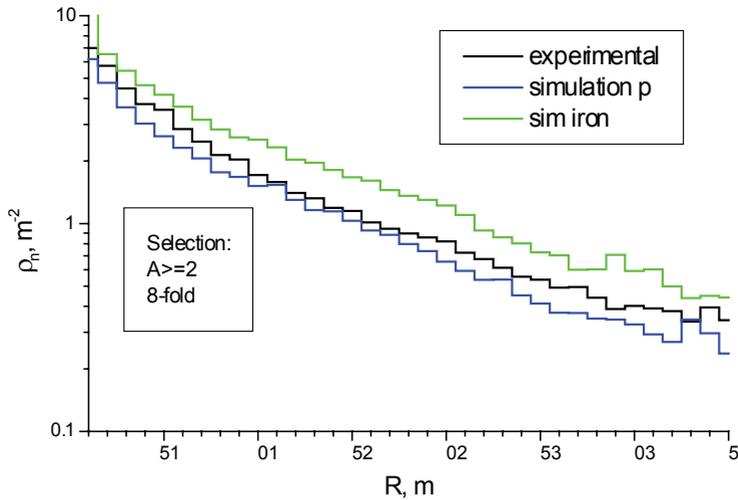


Рис. 5. ФПР тепловых нейтронов в ШАЛ для установки PRISMA-32: черная гистограмма — экспериментальные точки; синяя гистограмма — моделирование для протонов; зеленая гистограмма — моделирование для железа

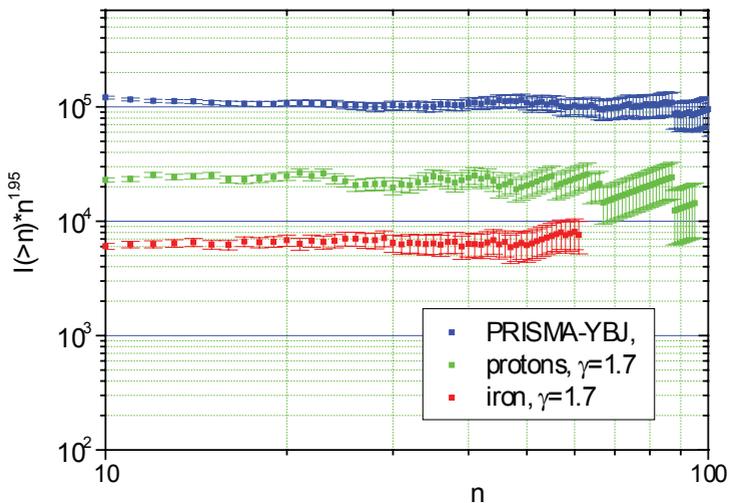


Рис. 6. Распределение ШАЛ по числу нейтронов по данным установки PRISMA-YBJ:

синие точки — эксперимент; зеленые точки — моделирование для протонов
красные точки — моделирование для железа

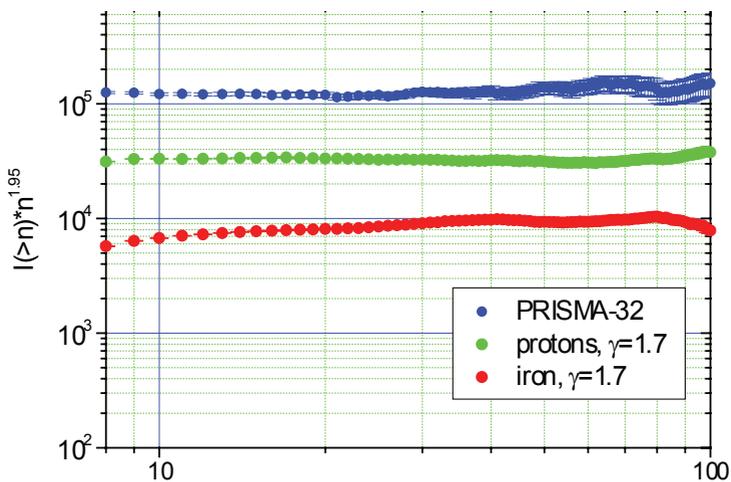


Рис. 7. Распределение ШАЛ по числу нейтронов по данным установки PRISMA-32:

Синие точки — эксперимент; зеленые точки — моделирование для протонов; Красные точки — моделирование для железа

были получены ФПП вторичных тепловых нейтронов в ШАЛ для экспериментов PRISMA-32 и PRISMA-YBJ. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными. Графики приведены на рис. 4 и 5.

На обоих рисунках точки приведены без нормировки, что говорит о хорошем согласии между моделированием и экспериментом и, следовательно, об адекватности проведенных расчетов.

Были получены расчетные спектры ШАЛ по числу вторичных тепловых нейтронов для первичных протонов и ядер железа для экспериментов PRISMA-32 и PRISMA-YBJ, расположенных на различных высотах. Полученные спектры так же, как и экспериментальный, хорошо описываются степенной зависимостью с показателем 1.95 для интегрального спектра. Спектры приведены на рис. 6 и 7.

В **пятой главе** изложено исследование фона в местах проведения экспериментов, в частности на Тибете. На рис. 8. показаны сезонные вариации фона случайных совпадений за 2.5 года

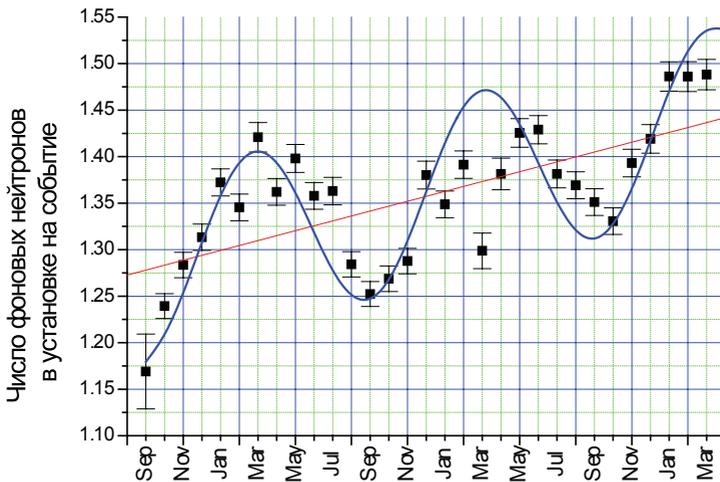


Рис. 8. Вариация среднемесячного числа фоновых нейтронов на один лицевой счетчик за все время работы установки PRISMA-YBJ с 09.2013 по 03.2016

наблюдений. По амплитуде эти вариации преобладают над остальными, однако даже их величина не превышает 10% от среднего значения. Сделан вывод о том, что вариации фона не являются препятствием для проведения эксперимента PRISMA-LHAASO и анализа полученных данных. Кроме того показаны суточные вариации, обусловленные изменением температуры, лунные вариации и влияние гроз на величину потока фоновых нейтронов.

В **заключении** перечислены основные результаты выполненной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проведено комплексное моделирование существующих прототипов установки PRISMA, расположенных в Москве и на Тибете. В моделировании использованы пакеты GEANT4.10 и CORSIKA6.9, широко применяемые сегодня для решения подобных задач. В ходе моделирования были получены: отклик эн-детектора на различные типы частиц, зависимость числа регистрируемых детектором нейтронов от энергии падающего адрона, функция пространственного распределения нейтронов относительно родительских адронов, функции пространственного распределения электромагнитной и нейтронной компонент ШАЛ в условиях проводимых экспериментов, хорошо фитирующиеся двойными экспоненциальными функциями с параметрами, зависящими от толщины крыши над детекторами.

2. Проведено измерение параметров адронной компоненты ШАЛ методом регистрации тепловых нейтронов путем создания двух небольших установок на разных высотах над уровнем моря. Проведена обработка и анализ экспериментальных данных установок PRISMA-YBJ и PRISMA-32.

3. Впервые с помощью эн-детекторов, расположенных на двух существенно различных высотах наблюдения, измерены функции пространственного распределения электромагнитной компонен-

ты ШАЛ и вторичных тепловых нейтронов, а также спектр ШАЛ по числу нейтронов в ПэВной области энергий, имеющий степенной вид с интегральным показателем -1.95 ± 0.05 для Тибета и -1.95 ± 0.05 для Москвы. Получено хорошее согласие экспериментальных данных с результатами расчетов, даже в абсолютных единицах, и с опубликованными в литературе экспериментальными данными для адронов ШАЛ. Показано, что ФПР нейтронов слабо зависит от высоты наблюдения, а разница объясняется, в основном, толщиной крыши над детекторами и геометрией экспериментов.

4. Проведен анализ данных по вариациям фона тепловых нейтронов на Тибете, получены амплитуды суточной температурной волны, сезонной волны, связанной с количеством осадков, а также обнаружена лунно-месячная волна и её 4-я гармоника. Показано, что сезонные, суточные и прочие вариации фона тепловых нейтронов, достаточно малы даже на Тибете (не более 10% от среднего значения) и не могут служить преградой для проведения там полномасштабного эксперимента PRISMA-LHAASO.

Список публикаций по теме исследования:

1. V. Alekseenko, F. Arneodo, G. Bruno, A. Di Giovanni, W. Fulgione, D. Gromushkin, O. Shchegolev, Yu. Stenkin, V. Stepanov, V. Sulakov and I. Yashin. Decrease of Atmospheric Neutron Counts Observed during Thunderstorms // *Phys. Rev. Lett.* 114, 125003 (2015).
2. B. Bartoli, ..., O. Shchegolev, ..., et al. Detection of thermal neutrons with the PRISMA-YBJ array in Extensive Air Showers selected by the ARGO-YBJ experiment // *Astropart. Phys.* 81, 49-60 (2016).
3. Д.М. Громушкин, В.И. Волченко, А.А. Петрухин, Ю.В. Стенькин, В.И. Степанов, О.Б. Щеголев, И.И. Яшин. Новый метод регистрации адронной компоненты ШАЛ // *Ядерная физика* 78, 379-382 (2015).
4. В.В. Алексеенко, Д.М. Громушкин, Д.Д. Джашпуев, А.У. Куджаев, О.И. Михайлова, Ю.В. Стенькин, В.И. Степанов, О.Б. Щеголев, В.П. Сулаков, И.И. Яшин. Вариации нейтронного потока во время гроз // *Известия РАН. Серия Физическая* 79, 5, 739-741 (2015).

5. Yu.V. Stenkin, V.V. Alekseenko, D.M. Gromushkin, A.A. Petrukhin E.V. Pletnikov, O.B. Shchegolev, V.I. Stepanov, A.L. Tsyabuk, A.A. Tsyshuk, G.V. Volchenko, V.I. Volchenko, I.I. Yashin. The ProtoPRISMA array for EAS study // Proc. 32nd ICRC 03, 1136 (2011).
6. Yu.V. Stenkin, V.V. Alekseenko, Z.Y. Cai, Z. Cao, C. Cattaneo, E. Giroletti, S.W. Cui, X.W. Guo, D.M. Gromushkin, H.H. He, Y. Liu, X.H. Ma, O.B. Shchegolev, V.I. Stepanov, A.L. Tsyabuk, P. Vallania, C. Vigorito and J. Zhao. Seasonal thermal neutron flux variations at high altitude // Proc. 34th ICRC, PoS(ICRC2015) 343 (2015).
7. A.A. Petrukhin, D.M. Gromushkin, O.B. Shchegolev, Yu.V. Stenkin, V.I. Stepanov, I.I. Yashin. EAS spectrum in thermal neutrons measured with PRISMA-32 // Proc. 34th ICRC, PoS(ICRC2015) 427 (2015).
8. Yu.V. Stenkin, V.V. Alekseenko, Z.Y. Cai, Z. Cao, C. Cattaneo, E. Giroletti, S.W. Cui, X.W. Guo, D.M. Gromushkin, H.H. He, Y. Liu, X.H. Ma, O.B. Shchegolev, P. Vallania, C. Vigorito and J. Zhao. Seasonal and Lunar month periods observed in natural neutron flux and radon concentration at high altitude // ArXiv:1605.05406 [physics.geo-ph]
9. Yu.V. Stenkin, D.M. Gromushkin, A.A. Petrukhin, O.B. Shchegolev, V.I. Stepanov, V.I. Volchenko, I.I. Yashin and E.A. Zadeba. EAS thermal neutron lateral and temporal distributions // arXiv:1512.02042v1 [astro-ph. IM]

ЩЕГОЛЕВ Олег Борисович

Изучение адронной компоненты широких атмосферных ливней
методом регистрации тепловых нейтронов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук на тему

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 0,9 Зак. № 22394 Тираж 100 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а