



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Алтайский государственный университет»  
пр-т Ленина, 61, г. Барнаул, 656049  
Тел. (385-2) 291-291. Факс (385-2) 66-76-26  
E-mail: rector@asu.ru

ОГРН 1022201770106 ИНН 2225004738/КПП 222501001  
л/с 20176U88990 ОКПО 02067818  
р/с 40501810401732000002 в ОТДЕЛЕНИЕ БАРНАУЛ г. Барнаул  
ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный университет»  
БИК 04 0173001

на № 26-02-2016 от 10-2-21/05/1122

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научному и  
инновационному развитию  
ФГБОУ ВПО «Алтайский  
государственный университет»

Тишкин А.А.



2016 г.

### О Т З Ы В

ведущей организации

на диссертационную работу Ивановой Анны Леонидовны  
«Исследование возможностей сцинтилляционной установки Tunka-Grande  
для изучения первичных космических лучей в области энергий  $10^{16} - 10^{18}$  эВ»  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий

Диссертация А.Л. Ивановой посвящена исследованию возможностей и разработке способов изучения первичного космического излучения (ПКИ) с помощью сцинтилляционной установки Tunka-Grande, представляющей собой комплекс наземных и подземных детекторов соответственно заряженных частиц и мюонов широких атмосферных ливней (ШАЛ), предназначенный для работы совместно с черенковской установкой Тунка-133 (впоследствии – в составе гамма-обсерватории TAIGA).

Актуальность работы обусловлена, во-первых, важностью эксперимента Tunka-Grande, рассчитанного на энергетическую область  $10^{16} - 10^{18}$  эВ, где имеется недостаток экспериментальных данных о ШАЛ и, во-вторых, необходимостью повышения точности восстановления параметров ШАЛ, включая выделение инициированных гамма-квантами событий, по экспериментальным наблюдаемым на основе многокомпонентных методов и процедур, объединяющих данные установок с различными технологиями регистрации (детектирование атмосферного черенковского излучения, заряженных частиц и мюонов, радиоизлучения ШАЛ).

Экспериментальный комплекс Тунка-133, Tunka-Rex, Tunka-Grande, TAIGA-NiSCORE, TAIGA-IACT представляет собой уникальный международный проект, предназначенный для решения широкого спектра задач (астро)физики космических лучей. Область энергий  $10^{16} - 10^{18}$  эВ является промежуточной между доступными для компактных и гигантских экспериментальных установок по регистрации ШАЛ энергетическими диапазонами. При этом именно в этой области, согласно стандартному сценарию, ожидается экспериментальное обнаружение перехода от

галактической компоненты ПКИ к экстрагалактической, для чего необходимы детальные надежные данные о структуре энергетических спектров и элементном составе ПКИ.

Основные результаты, полученные в диссертационном исследовании, заключаются в следующем.

- На основе результатов моделирования развития ШАЛ в атмосфере методом Монте-Карло при помощи кода Aires применительно к условиям эксперимента Tunka-Grande выполнены расчеты пространственного распределения заряженной и мюонной компонент ШАЛ, корреляции числа электронов и числа мюонов с энергией первичной частицы.
- Разработано программное обеспечение для моделирования процесса регистрации заряженной компоненты ШАЛ с помощью установки Tunka-Grande, проведены расчеты, необходимые для выбора геометрических размеров установки и конструкции детекторов, оптимальных с точки зрения достижения максимально возможной эффективности регистрации ШАЛ.
- Разработан мультикомпонентный метод восстановления параметров ШАЛ на основе экспериментальных данных, получаемых с помощью системы детекторов установки Tunka-Grande, регистрирующих мюонную и электронно-фотонную компоненты ШАЛ, а также программное обеспечение для обработки экспериментальных данных.

Представленные автором результаты соответствуют поставленным целям.

**Достоверность** результатов обеспечивается использованием широко распространенного в данной области исследований математического обеспечения для моделирования развития ШАЛ в атмосфере (код Aires), корректных методов и процедур статистического анализа.

**Научная новизна** результатов диссертации состоит как в получении оценок параметров конкретной установки, оптимальных с точки зрения достижения максимальной эффективности регистрации ШАЛ, так и в анализе точности и качества восстановления основных параметров ШАЛ (направления прихода и положения оси ливня, полного числа заряженных частиц и полного числа мюонов), полученных при использовании разработанной методики обработки событий. Важными новыми результатами, полученным автором работы, следует считать анализ возможностей выбранной конфигурации установки Tunka-Grande изучения тонкой структуры энергетического спектра ПКИ, а также вывод о перспективности использования локальной плотности числа заряженных частиц на расстоянии 300 м от оси ливня как для восстановления первичного спектра, так и для анализа массового состава ПКИ.

Во **введении** диссертации автор обосновывает актуальность темы исследования, определяет цель работы и описывает структуру диссертации. Приведен личный вклад автора в работу, изложены основные результаты, новизна, научная и практическая ценность работы.

В **первой главе** дан подробный и достаточно полный обзор основных экспериментов, ведущих исследования ПКИ в области высоких и сверхвысоких энергий методом ШАЛ. Рассмотрены принципы работы установок, описаны используемые методики восстановления параметров ШАЛ и реконструкции энергетического спектра ПКИ.

Во **второй главе** приведено описание установки Tunka-133. Рассмотрены перспективы создания гамма-обсерватории TAIGA, приведено описание установок, которые в будущем войдут в ее состав. Подробно описан сцинтилляционный комплекс Tunka-Grande, использующий счетчики, ранее работавшие в составе установки KASCADE-Grande, и подземный детектор мюонов.

В **третьей главе** описывается технология моделирования ШАЛ и приводится описание программного пакета Aires, предназначенного для изучения эволюции и свойств широких атмосферных ливней. Представлены полученные в результате анализа данных Aires зависимости полного числа электронов и полного числа мюонов от энергии первичных частиц в предположении чисто протонного и чисто железного состава ПКИ. Получена зависимость флуктуаций полного числа электронов ШАЛ от энергии первичной частицы. Описана процедура оценки пробега поглощения электронов и мюонов ШАЛ по результатам моделирования. Представлены построенные по данным Aires средние функции пространственного распределения мюонов в ШАЛ.

В **четвертой главе** представлено программное обеспечение, разработанное для моделирования работы установки Tunka-Grande и описана процедура регистрации смоделированных событий. Описаны процедуры моделирования плотности электронов и мюонов в ШАЛ, а также задержек времени прихода частиц в детекторы установки с учетом флуктуаций.

В **пятой главе** представлена разработанная процедура восстановления экспериментальных данных, описаны основные этапы восстановления событий ШАЛ на примере обработки данных моделирования. Приведены результаты восстановления смоделированных событий, позволяющие оценить средние характеристики ШАЛ. Рассмотрено восстановление направления прихода, положения оси в плоскости установки, полного числа заряженных частиц, полного числа мюонов, а также локальной плотности заряженных частиц на расстоянии 300 м от оси ШАЛ, восстановление энергии первичной частицы.

В **заключении** приведены основные результаты и выводы работы.

В качестве **замечаний** к представленной диссертации можно указать следующее.

1. В работе не приводятся результаты тестовых расчетов основных характеристик ШАЛ и их сопоставления с данными других авторов, использующих коды Aires и CORSIKA. Из текста работы очевидно, что подобные сопоставления проводились, однако, на наш взгляд, их следовало бы привести в тексте диссертации.
2. Недостаточно подробно рассмотрены вопросы влияния модели адрон-ядерных взаимодействий на результаты моделирования. Приводятся указания на количественные данные других авторов лишь о различиях между результатами, полученными в моделях QGSJetII и SYBILL 2.1, что на сегодняшний день не может считаться исчерпывающим.
3. Недостаточно подробно обсуждается выбор функций пространственного распределения электронов и мюонов и влияние этого выбора на точность восстановления таких параметров ШАЛ, как положение оси, полное число частиц на уровне наблюдения, локальная плотность на расстоянии 300 м от оси.
4. При моделировании работы детекторов установки Tunka-Grade не рассматривается зависимость от радиального расстояния отношения плотности энерговыделения в сцинтилляционном детекторе к реальной локальной плотности числа частиц над ним. Указанный эффект, обусловленный изменением с радиальным расстоянием спектров проникающих в детектор частиц, оказывает влияние на форму радиального распределения заряженных частиц, измеряемого сцинтилляционными счетчиками, и должен быть принят во внимание при сопоставлении экспериментальных данных и результатов моделирования.
5. В работе не рассматривается чувствительность результатов к значительным сезонным вариациям температурного профиля атмосферы, несомненно имеющим место при эксплуатации установки в условиях Тункинской долины.

В целом, перечисленные выше замечания не снижают общей высокой оценки представленной диссертационной работы. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Основные результаты исследования отражены в 16 публикациях, в том числе в 14 научных статьях в международных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 3 научные статьи опубликованы в рецензируемых российских журналах, рекомендованных ВАК.

Таким образом, диссертация А.Е. Ивановой «Исследование возможностей сцинтилляционной установки Tunka-Grande для изучения первичных космических лучей в области энергий  $10^{16} - 10^{18}$  эВ» на соискание ученой степени кандидата

физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий является научно-квалификационной работой, посвященной актуальной проблеме современной астрофизики высоких энергий. Научные результаты, полученные диссертантом, являются новыми и имеют существенное значение для науки и практики. Выводы и рекомендации работы достаточно обоснованы. Работа соответствует требованиям и критериям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор – Иванова Анна Леонидовна – заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий.

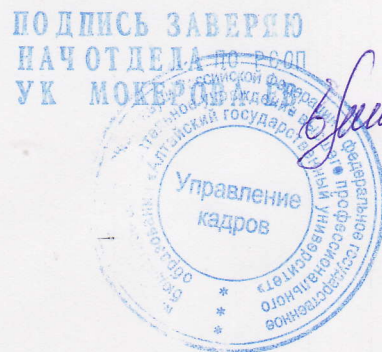
Отзыв обсужден на заседании кафедры радиофизики и теоретической физики (протокол № 7 от 26 февраля 2016 г.).

Заведующий кафедрой радиофизики и теоретической физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный университет», пр. Ленина, 61, Барнаул, 656049, Россия, тел. +7 (3852) 367075, e-mail: lagutin@theory.asu.ru, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика ядра и элементарных частиц, профессор

Доцент кафедры радиофизики и теоретической физики, проректор по развитию международной деятельности федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный университет», пр. Ленина, 61, Барнаул, 656049, Россия, тел. +7 (3852) 291205, e-mail: raikin@theory.asu.ru, кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика ядра и элементарных частиц, доцент

*Лагутин*

Лагутин Анатолий Алексеевич



*Райкин*

Райкин Роман Ильич

