



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего 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 ВО «Алтайский государственный университет»
БИК 04 0173001

№ _____
на № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научному и
инновационному развитию
ФГБОУ ВО «Алтайский
государственный университет»
Попов Е.С.

06.04.2018 г.

О Т З Ы В

ведущей организации

на диссертационную работу **Сабурова Артема Владимировича**
«Пространственное распределение частиц ШАЛ с энергией выше 10^{17} эВ по
данным Якутской установки» на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности 01.04.16 – Физика атомного
ядра и элементарных частиц

Диссертация А.В. Сабурова посвящена исследованию функций пространственного распределения (ФПР) электромагнитной и мюонной компонент широких атмосферных ливней (ШАЛ) с энергией выше 10^{17} эВ, регистрируемых Якутской установкой ШАЛ (ЯКУ ШАЛ), их использованию для получения оценок глубины максимума каскадной кривой, энергии первичной частицы и массовому составу по данным этой установки.

Актуальность темы диссертации не вызывает сомнений, поскольку для решения фундаментальных проблем происхождения космических лучей и установления механизмов их ускорения до сверхвысоких энергий ($E > 10^{17}$ эВ) необходимы надежные данные о характеристиках первичного космического излучения (ПКИ). Сегодня получение таких данных возможно лишь в рамках «метода ШАЛ», т.е. восстановления направлений прихода частиц ПКИ, их энергий и типа путем совместного анализа продольных и радиальных характеристик различных компонент ядерно-электромагнитного каскада, развивающегося в атмосфере Земли. В силу этого диссертационная работа А. В. Сабурова, направленная на установление ФПР электромагнитной и мюонной компонент ШАЛ, их использованию для получения оценок глубины максимума каскадной кривой, энергии первичной частицы и массового состава по данным

ЯКУ ШАЛ в энергетической области, в которой согласно стандартному сценарию ожидается переход от галактической компоненты ПКИ к внегалактической, является, безусловно, актуальной.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и одного приложения. Объем диссертации составляет 146 страниц, включая 58 рисунка, 3 таблицы и список использованной литературы из 200 наименований.

Во **введении** диссертации автор обосновывает актуальность темы исследования, определяет цель работы и описывает структуру диссертации. Приведен личный вклад автора в работу, изложены основные результаты, выносимые на защиту, научная новизна и практическая ценность работы. Дается обзор литературы по теме исследования.

В **первой главе** даются общие сведения о комплексной установки ЯКУ ШАЛ, обсуждаются методы измерения плотности частиц сцинтилляционными детекторами и их калибровка, а также методики определения направления прихода ливня и построения оценки первичной частицы.

Вторая глава носит обзорный характер. В ней обсуждается пакет CORSIKA, который сегодня используется большинством исследовательских групп для моделирования ШАЛ высокой и сверхвысокой энергий.

Третья глава посвящена исследованию ФПР частиц, измеряемых сцинтилляционными детекторами ЯКУ ШАЛ. Обсуждается разработанная автором одномерная модель наземного сцинтилляционного детектора установки. В рамках этой модели с использованием энергетических спектров электронов, фотонов и мюонов ШАЛ на различных расстояниях от оси ливня, полученных по данным кода CORSIKA, рассчитываются отклики детектора, вызванные их взаимодействием с веществом детектора. Представлены и обсуждаются результаты расчета пространственного распределения ФПР частиц, даются аппроксимации для электромагнитной и мюонной компонент ШАЛ. Отмечается, что с использованием установленных аналитических выражений для ФПР компонент ШАЛ находятся плотности частиц на расстояниях 300 и 600 метров, полное число частиц, а также локальная крутизна спада радиального распределения электромагнитной и мюонной компонент в нескольких диапазонах расстояний от оси ливня. В заключительном разделе главы представлены выражения, позволяющие восстанавливать энергию первичной частицы по плотности частиц ШАЛ на расстоянии 600 м от оси ливня для четырех моделей адрон-ядерных взаимодействий пакета CORSIKA.

В **четвертой главе** полученные автором модельные результаты используются для интерпретации экспериментальных данных ЯКУ ШАЛ. Обсуждается оценка массового состава первичных КЛ с энергией $E > 10^{17}$ эВ,

полученная с использованием локальной крутизны спада радиального распределения электромагнитной компоненты в диапазоне расстояний 100 – 400 м от оси, а также данных подземных мюонных детекторов. В рамках калориметрического метода восстановления энергии первичной частицы, используемого при обработке данных Якутской установки, получена новая оценка связи этой энергии с плотностью частиц на расстоянии 600 м от оси ливня. Представлен энергетический спектр всех частиц с энергией выше 10^{17} эВ по данным ЯКУ ШАЛ.

В заключении приведены основные результаты и выводы работы.

В приложении дается описание базы данных событий, зарегистрированных Якутской установкой.

Оценка новизны и практической значимости. Научная новизна результатов диссертации состоит в установлении функций пространственного распределения откликов наземных и подземных сцинтилляционных детекторов Якутской установки в рамках четырех моделей адрон-ядерных взаимодействий и их аналитических аппроксимаций, в определении средней глубины максимума каскадной кривой в диапазоне энергий выше 10^{17} эВ, а также в уточнении оценки связи энергии первичной частицы с плотностью частиц на расстоянии 600 м от оси ливня. Новыми результатами работы является оценка массового состава космических лучей и энергетический спектр всех частиц с энергиями выше 10^{17} эВ по данным ЯКУ ШАЛ.

Практическая значимость состоит в построении модели сцинтилляционного детектора ЯКУ ШАЛ, получении оценок корректирующих функций, позволяющих переходить от ФПР электронов, фотонов и мюонов к функции пространственного распределения показаний детектора, а также в разработке базы экспериментальных данных Якутской установки ШАЛ.

Степень обоснованности научных положений и выводов. Обоснованность результатов обеспечивается использованием широко распространенного в данной области исследований математического обеспечения для моделирования развития ШАЛ в атмосфере (код CORSIKA), корректных методов и процедур статистического анализа, сравнением теоретических результатов с экспериментальными данными.

Диссертация написана ясным языком с использованием принятой в данном направлении исследований терминологии. Оформление диссертации существенных замечаний не вызывает. Основные результаты работы в достаточной степени отражены в публикациях автора, представлялись на ряде научных конференций. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

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

1. В работе не представлены сопоставления расчетов основных характеристик ШАЛ с данными других авторов, использующих код CORSIKA. Из текста работы очевидно, что подобные сопоставления проводились, однако, на наш взгляд, их следовало бы привести в тексте диссертации.
2. В разделе 3.4 главы 3 автор приводит зависимости функции отклика наземного сцинтилляционного детектора установки от энергии для электронов, фотонов и мюонов. Однако в разделе отсутствует обсуждение приближений, при которых были вычислены эти функции. Так, например, неясно, учитывалось ли каскадное размножение частиц в веществе детектора, вынос энергии из детектора вторичными частицами. Автору следовало бы также дать оценку погрешностей рассчитанных функций отклика.
3. В заключительном разделе главы 3 приведены выражения, позволяющие восстанавливать энергию первичной частицы по плотности частиц ШАЛ на расстоянии 600 м от оси ливня для четырех моделей адрон-ядерных взаимодействий пакета CORSIKA, а также выражение, полученное их усреднением. Последняя аппроксимация (3.31) используется автором при восстановлении энергетического спектра всех частиц по данным наземных сцинтилляционных детекторов ЯКУ ШАЛ. Однако в диссертации отсутствует обсуждение корректности использования такого подхода при обработке данных.
4. В работе не рассматривается чувствительность результатов к значительным сезонным вариациям температурного профиля атмосферы, несомненно имеющим место при эксплуатации установки в период сентябрь-апрель в условиях Якутска, влияние этих вариаций на форму ФПР частиц.

В целом, перечисленные выше замечания не снижают общей высокой оценки представленной диссертационной работы. Основные результаты исследования отражены в 13 публикациях, 10 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК.

Таким образом, диссертация А.В. Сабурова «Пространственное распределение частиц ШАЛ с энергией выше 10^{17} эВ по данным Якутской установки» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц является научно-квалификационной работой, посвященной актуальной проблеме современной астрофизики космических лучей 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 – Сабуров Артем Владимирович – заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц.

Отзыв обсужден на заседании кафедры радиофизики и теоретической физики (протокол № 7 от 2 апреля 2018 г.).

Заведующий кафедрой радиофизики
и теоретической физики федерального
государственного бюджетного
образовательного учреждения
высшего 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

Лагутин Анатолий Алексеевич

Доцент кафедры радиофизики
и теоретической физики, проректор по развитию
международной деятельности федерального
государственного бюджетного
образовательного учреждения
высшего 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

Райкин Роман Ильич

Список публикаций сотрудников ведущей организации в рецензируемых журналах

1. Райкин Р.И., Серебрякова Т.Л., Лагутин А.А., Волков Н.В. Уточнение массового состава космических лучей с использованием масштабного параметра радиального распределения электронов в атмосферных ливнях // Известия РАН. Сер. Физ. 2017. Т. 81., № 4, с. 488—491.
2. Raikin R., Serebryakova T., Lagutin A., Volkov N. Model-stable universality of the air shower electromagnetic component: An approach to solving the mass composition problem // EPJ Web of Conferences. 2017. Vol. 145. 19014.
3. Лагутин А.А., Волков Н.В., Тюменцев А.Г. Влияние конечности скорости движения частиц на энергетический спектр космических лучей в модели аномальной диффузии с полетами Леви // Известия РАН. Сер. Физ. 2017. Т. 81. № 4. С. 484—487.
4. Dontsov A.A., Volkov N.V., Lagutin A.A. The regional geoinformation remote sensing system // J. Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2015. № 6 (8). С. 763-768.
5. Yakunin, M.A. A hybrid method for evaluating absorbed solar energy at the surface level using remote sensing data // J. Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2015. Vol. 8(2). Pp. 224-229.
6. Лагутин А.А., Тюменцев А.Г., Волков Н.В., Райкин Р.И. Спектры протонов и ядер в диапазоне 10^{10} - 10^{20} эВ в рамках галактического сценария происхождения космических лучей // Известия РАН. Сер. Физ. 2015. Т. 79. № 3. С. 354--357.
7. Yakunin M.A., Yurchenko A.V. MODTRAN5 simulations of responses from MODIS spectroradiometer channels // Tech. Phys. 2015. Vol. 60. Pp. 141-144.
8. Лагутин А.А., Райкин Р.И. Серебрякова Т.Л. Свойство универсальности атмосферных ливней в диапазоне энергий от 10^{14} до 10^{22} эВ // Изв. РАН. Сер. Физ. 2013. Т. 77. №5. С. 692-694.
9. Lagutin A.A., Volkov N.V., Tyumentsev A.G. Fraction of cosmic ray positrons in the Galaxy: Results from using the fractional diffusion approach // Bull. Russian Academy of Sciences. Phys. 2013, Vol. 77. No 11. Pp. 1312-1314.