

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Монхоева Романа Дмитриевича на тему:
«Сцинтилляционная установка Tunka-Grande для исследования
космического излучения в диапазоне энергий 10^{16} – 10^{18} эВ:
создание и результаты»
по специальности 1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц,
физика высоких энергий**

Диссертация Р.Д. Монхоева посвящена созданию сцинтилляционной установки Tunka-Grande, предназначенной для исследования космического излучения в диапазоне энергий 10^{16} – 10^{18} эВ совместно с другими детекторами Тункинского астрофизического центра коллективного пользования ИГУ (ТАЦКП), а также анализу экспериментальных данных, полученных с ее помощью в период с 2017 по 2021 гг.

Актуальность представленной диссертационной работы определяется двумя обстоятельствами. Во-первых, рост интереса к изучению космических лучей с энергиями в диапазоне 10^{16} – 10^{18} эВ, в котором, в частности, при энергии $\sim 2 \times 10^{16}$ эВ в ряде экспериментов (KASCADE-Grande, IceTop и др.) наблюдается изменение наклона энергетического спектра, не имеющее на данный момент однозначного объяснения. Данная область энергии также представляет особый интерес с точки зрения поиска источников космического гамма-излучения и исследования диффузного гамма-излучения. Во-вторых, для повышения информативности экспериментальных данных в настоящее время создаются новые гибридные научные установки (например, LHAASO и SKA), способные одновременно регистрировать большое число компонент, а также активно развиваются уже существующие за счет расширения состава используемых типов детекторов (например, ЭК НЕВОД, Telescope Array, Pierre Auger Observatory), и астрофизический комплекс TAIGA не является исключением.

Автором создана ливневая установка Tunka-Grande для регистрации электрон-фотонной и мюонной компонент ШАЛ, которая состоит из 19

сцинтилляционных станций, размещенных на площади около 0.5 км^2 и объединенных в единую систему центром сбора данных, общим для всех детекторов и установок ТАЦКП. Установка Tunka-Grande способна работать как в независимом режиме, что позволяет более чем на порядок увеличить время набора экспериментальных данных за сезон наблюдений в ТАЦКП, так и в режиме триггирования от черенковской установки Тунка-133, что дает возможность проводить мультикомпонентные исследования ШАЛ. Высокая точность временной привязки регистрируемых в Tunka-Grande событий позволяет анализировать её данные совместно с экспериментальной информацией с других установок астрофизического комплекса TAIGA.

В работе подробно описана конструкция используемых в установке сцинтилляционных счетчиков и собранных из них станций, приводятся точные координаты расположения станций, обсуждается система кабельных линий связи и схема подключения детекторов в станциях. Выбор тех или иных технических решений обоснован автором непосредственно в тексте диссертации, а в некоторых случаях подкреплен результатами компьютерного моделирования или экспериментального тестирования.

Не менее подробно представлено устройство и принцип работы программно-аппаратного комплекса установки Tunka-Grande, который включает ряд систем: сбора данных, временной синхронизации, управления и мониторинга. Большинство его элементов идентичны или аналогичны тем, которые успешно используются в установках Тунка-133 и Tunka-Rex. Следует отметить, что подобные аппаратно-программные комплексы хорошо зарекомендовали себя и в других экспериментах, в частности, в Байкальском нейтринном телескопе и в ливневой установке НЕВОД-ШАЛ.

С помощью **разработанного автором** метода была проведена амплитудная калибровка сцинтилляционных счетчиков, имеющих три динамических диапазона. Такая калибровка необходима для обеспечения единого энергетического порога регистрации детекторов и перехода от измеряемых параметров сигналов к числу частиц. По результатам тестовых

измерений продемонстрирована эффективность разработанного метода калибровки, а также показано, что предельная регистрируемая плотность частиц ШАЛ достигает 12000 частиц/м².

Работа установки в течение сеансов наблюдений регулярно контролируется с помощью программно-аппаратных средств мониторинга в автоматическом режиме. Амплитудная калибровка сцинтилляционных счетчиков осуществляется не реже одного раза в год.

Точность реконструкции параметров ШАЛ созданной установкой определена путем сопоставления данных Tunka-Grande с результатами реконструкции этих же событий по данным установки Тунка-133, имеющей точность определения направления прихода оси ливня и ее положения лучше 0.12° и 6 м, соответственно, и энергетическое разрешение ~ 15%. Точность реконструкции направления прихода и положения оси ШАЛ в установке Tunka-Grande лучше 2.3° и 6 м, соответственно, а ее энергетическое разрешение лучше 36%.

По результатам анализа экспериментальных данных Tunka-Grande, накопленных с 2017 по 2021 гг., автором получены дифференциальный энергетический спектр космических лучей и верхний предел на поток диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий 10¹⁶–10¹⁸ эВ, которые не противоречат аналогичным результатам других экспериментов.

Таким образом, **основные научные положения и выводы диссертации обоснованы и достоверны.**

На мой взгляд, **научная новизна** заключается, в основном, в том, что в состав Тункинского астрофизического центра коллективного пользования ИГУ включена установка, регистрирующая электрон-фотонную и мюонную компоненты широкого атмосферного ливня и позволяющая реконструировать такие параметры ШАЛ, как направление прихода, положение оси, полное число частиц электрон-фотонной и мюонной компонент и их плотность на расстоянии 200 м от оси. В результате, в ТАЦКП впервые реализована возможность проведения

мультикомпонентного исследования космических лучей в диапазоне энергий 10^{16} – 10^{18} эВ при совместной работе Tunka-Grande и черенковской установки Тунка-133.

Совместная работа созданной автором установки Tunka-Grande с существующими и создаваемыми в астрофизическом комплексе TAIGA детекторами открывает новые возможности в исследовании энергетического спектра, массового состава и анизотропии космических лучей, а также поиска источников гамма-излучения и диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий 10^{16} – 10^{18} эВ.

Разработанные методы калибровки, технические решения, отдельные результаты могут быть использованы при разработке и проведении новых экспериментов в области физики космических лучей и гамма-астрономии, а в настоящее время уже применяются при создании сцинтилляционной установки TAIGA-Muon.

Полученные по экспериментальным данным установки Tunka-Grande дифференциальный энергетический спектр космических лучей и ограничение на поток гамма-квантов в диапазоне энергий 10^{16} – 10^{18} эВ наряду с результатами других мировых экспериментов могут быть использованы для подтверждения, развития или исключения существующих астрофизических моделей.

Работа прошла **апробацию** на международных и российских конференциях. Основные научные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus, и в изданиях из перечня, рекомендованного ВАК.

Замечания по работе:

1. В первой главе, в которой приводится обзор установок для исследования КЛ в диапазоне энергий 10^{16} – 10^{18} эВ, автор немного запутался в структуре эксперимента KASCAGE-Grande и названиях отдельных его установок. В тексте диссертации под *KASCADE-Grande* на самом деле подразумевается *Grande array*, а сцинтилляционная установка *Piccolo array*

названа *KASCADE-Piccolo* (см. *W.D. Apel, et al., NIM A, 620 (2010) 202–216*). Также в названии Тянь-Шаньской высокогорной научной станции ФИАН повсеместно пропущено слово *научная*, а в названии установки Haverah Park отсутствует буква *h*.

2. В диссертации на всех рисунках, представляющих графики экспериментальных зависимостей или распределений с аппроксимацией, указаны значения параметров фитирующих функций, но не указаны погрешности их определения, как, например, на рисунках 3.2, 4.5 и 5.6.

3. В главе 4 при описании процедуры реконструкции направления прихода ШАЛ (стр. 88) утверждается: «Нулевое приближение для зенитного и азимутального углов прихода оси ШАЛ восстанавливается в предположении плоского фронта ливня по времени срабатывания трех наземных частей станций, которые имеют наибольшую зарегистрированную плотность частиц и оптимальную геометрию». Что в данном случае подразумевается под «оптимальной геометрией», в работе не объясняется.

4. При описании конструкции сцинтилляционного счетчика (стр. 48) автор утверждает, что его корпус выполнен из дюралюминия толщиной 1 мм. Данные счетчики ранее использовались в экспериментах EAS-Top и KASCADE-Grande. В публикациях, посвященных этим экспериментам (см. *M. Aglietta, et al., NIM A, 336 (1993) 310-321* и *W.D. Apel, et al., NIM A, 620 (2010) 202–216*), говорится о том, что материалом корпусов сцинтилляционных счетчиков является нержавеющая сталь.

5. В целом диссертация выстроена логически правильно, написана хорошим языком и довольно легко читается. Однако в тексте работы встречаются плохо построенные предложения, орфографические и пунктуационные ошибки. Вот несколько примеров. «Под калориметром размещались 32 многопроволочных пропорциональных камеры, расположенных в 2 слоя...» (стр. 19). «Помимо этого экспериментальный комплекс для исследования КЛ также включает в себя системы...» (стр. 25). «При этом территориально они разбиты на 2 зоны (пропущена запятая) и

расстояние между ними составляет 400 м и 600 м в зависимости от принадлежности к той или иной области...» (стр. 33). Автор использует некорректные сокращения слов *год*, *годах* и т.п.: отсутствует точка после *г* и *гг*. Более того, *г* без точки является обозначением единицы измерения массы (грамм). Временами возникают вопросы к верстке рукописи. Так, например, рисунок 1.1., на котором представлено расположение установки ШАЛ-МГУ, оказался «внутри» раздела с описанием эксперимента KASCADE-Grande.

Указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования и не снижают общей высокой оценки работы.

Содержание диссертации соответствует специальности **1.3.15 «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий»**, а именно ее направлению 4 «Техника и методика эксперимента в области физики атомных ядер и элементарных частиц и физики высоких энергий». Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертация Р.Д. Монхоева «Сцинтилляционная установка Tunka-Grande для исследования космического излучения в диапазоне энергий 10^{16} – 10^{18} эВ: создание и результаты» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком профессиональном уровне, которая соответствует требованиям и критериям, определенным пп. 2.1-2.5 «Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», а также оформлена согласно требованиям «Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова».

Таким образом, соискатель **Монхоев Роман Дмитриевич** заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **1.3.15 «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий»** за создание сцинтилляционной установки Tunka-Grande, существенно расширяющей возможности астрофизического

комплекса TAIGA в исследованиях космического излучения в диапазоне энергий 10^{16} – 10^{18} эВ.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник НОЦ НЕВОД,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»

Шульженко Иван Андреевич

27.11.2023

Контактные данные:

тел.: +7(916)038-12-25, e-mail: IAShulzhenko@mephi.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

Адрес места работы:

115409, г. Москва, ул. Каширское шоссе, д. 31,

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Научно-
образовательный центр НЕВОД

Тел.: +7(495)788-56-99, доб. 8410; e-mail: IAShulzhenko@mephi.ru

Подпись сотрудника И.А. Шульженко удостоверяю:

Директор
Дирекции по управлению персоналом
НИЯУ МИФИ

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ
ДИРЕКТОР ПО ПЕРСОНАЛУ
НИЯУ МИФИ
Л.В. ВАСИЛЬЧЕНКО

Л.В. Васильченко



27.11.2023