

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 Монхоева Р. Д. посвящена созданию сцинтилляционной установки Tunka-Grande для регистрации электрон-фотонной и мюонной компонент широких атмосферных ливней (ШАЛ), а также результатам, полученным за первые 5 лет ее работы. Главной задачей эксперимента является исследование космического излучения в диапазоне энергий $10^{16} - 10^{18}$ эВ совместно с действующей черенковской установкой ШАЛ Тунка-133. **Актуальность темы исследования** обуславливается, с одной стороны, отсутствием на сегодня согласованной картины в области физики космических лучей (КЛ) в этом диапазоне энергий. Существующие различия в экспериментальных данных не позволяют однозначно объяснить природу первичного излучения. С другой стороны, в составе КЛ высоких и сверхвысоких энергий, помимо первичных ядер, также предсказывается наличие гамма-квантов. Но до сих пор не было обнаружено астрофизических фотонов с энергией выше 10^{16} эВ, и в настоящее время установлены ограничения на их поток. Для ответа на фундаментальные вопросы в области физики КЛ необходимы более надежные экспериментальные данные. Это приводит к необходимости создания новых или модернизации существующих наземных установок, а также развития методик детектирования КЛ, обработки и анализа данных.

Целью диссертационной работы является создание и ввод в эксплуатацию сцинтилляционной установки Tunka-Grande, а также восстановление энергетического спектра КЛ и поиск диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий 10^{16} - 10^{18} эВ по экспериментальным данным установки Tunka-Grande.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и 4 приложений. Полный объем работы составляет 136 страниц, включая 69 рисунков и 5 таблиц. Список литературы содержит 163 наименования.

Во **введении** приводится краткое описание свойств КЛ и методов их регистрации, подчеркивается важность исследований в энергетическом диапазоне 10^{16} - 10^{18} эВ, обосновывается актуальность создания установки Tunka-Grande. Также формулируются цель, задачи, объект и предмет диссертационного исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, основные защищаемые положения представляемой работы. Дополнительно аргументируется достоверность полученных результатов, определяется личный вклад автора, приводится перечень основных публикаций и структура диссертации.

Первая глава посвящена актуальному на момент написания диссертации состоянию исследований КЛ в области энергий 10^{16} - 10^{18} эВ. Приводится обзор установок, формирующих основной массив данных в рассматриваемом энергетическом диапазоне, обсуждаются результаты их работы. Обзор написан хорошо, что свидетельствует о знании автором экспериментальных установок.

Вторая глава содержит подробное описание процесса создания и устройства установки Tunka-Grande. Строительство установки началось в 2013 г и за достаточно короткий период времени удалось создать в дополнение к действующей установке Тунка-133 массив синхронно работающих станций, равномерно разнесенных между собой на расстояние порядка 200 м. Каждая станция состоит из наземной и подземной частей для регистрации электрон-фотонной и мюонной компонент ШАЛ, в которых располагаются сцинтилляционные счетчики, ранее применяемые в экспериментах EAS-TOP и KASCADE-Grande. Скорость развертывания установки Tunka-Grande обусловлена накопленным опытом при создании и эксплуатации установки Тунка-133, а также использованием ее инфраструктуры и архитектуры аппаратно-программного комплекса. К достоинствам новой установки следует отнести равномерно размещенную сеть мюонных детекторов на площади порядка 0.5 км^2 и реализацию гибридного подхода к изучению КЛ в диапазоне

энергий 10^{16} - 10^{18} эВ, заключающегося в одновременной регистрации заряженной компоненты и черенковского излучения ШАЛ.

Третья глава посвящена вводу в эксплуатацию установки Tunka-Grande. В рамках главы проведены описания измеряемых параметров сигналов со сцинтилляционных счетчиков, методик тестирования, отладки и калибровки установки, а также процедуры проведения сеансов набора экспериментальных данных.

Зарегистрированные события со станций установки Tunka-Grande поступают в единый центр сбора данных в виде осциллограмм длительностью до 5 мкс и шагом дискретизации 5 нс. Следует отметить, что это позволяет не только анализировать форму сигналов, но и проводить поиск возможных пред и после импульсов от ШАЛ. Амплитудная калибровка счетчиков осуществляется при помощи двух методик, разработанных для разных динамических диапазонов регистрации сигналов. Первый случай основан на измерении отклика счетчиков при их регистрации одиночных атмосферных мюонов, второй - на использовании наносекундного импульсного источника света. Показано, что применяемые методики эффективны для задач установки Tunka-Grande. В ходе тестирования аппаратуры установки определены оптимальные режимы работы станций, при которых потеря событий из-за эффекта мертвого времени системы сбора данных не превышает 5%. В полной мере сеансы набора экспериментальных данных проводятся с 2016 г.

В четвертой главе приводится описание процедуры реконструкции параметров ШАЛ и КЛ по экспериментальным данным установки Tunka-Grande и анализ совместных событий установок Тунка-133 и Tunka-Grande. Процедура реконструкции основана на опыте работы установки ШАЛ-МГУ и является достаточно стандартной для экспериментов, регистрирующих заряженную компоненту ШАЛ. Основная идея анализа гибридных событий заключается в утверждении, что установка Тунка-133 изначально обладает более высокой, экспериментально подтвержденной точностью восстановления параметров ШАЛ и КЛ. На основе проведенного анализа определены ошибки реконструкции параметров ШАЛ и методика восстановления энергии КЛ. Показано, что при

выбранных критериях отбора (зенитный угол до 35° , положение оси в круге 350 м и энергия выше 10^{16} эВ) точность реконструкции направления прихода оси ливня и ее положение не превышает 2.3° и 26 м. Определение энергии КЛ состоит в использовании корреляции плотности заряженных частиц на расстоянии 200 м от оси ШАЛ (параметр ρ_{200}) и энергии, восстановленной по черенковском свету установкой Тунка-133. Параметр ρ_{200} слабо зависит от формы используемой функции пространственного распределения частиц. При таком подходе энергетическое разрешение установки составляет порядка 40%.

Пятая глава включает в себя главные результаты диссертации, а именно: восстановление дифференциального энергетического спектра КЛ и поиск диффузного гамма-излучения по экспериментальным данным установки Tunka-Grande в диапазоне энергий 10^{16} - 10^{18} эВ. Полученный спектр достаточно хорошо согласуется с мировыми данными и демонстрирует наличие изломов при энергии $2 \cdot 10^{16}$ и 10^{17} эВ, которые пока не могут быть однозначно интерпретированы. Также необходимо отметить, что наблюдаемое согласие восстановленного спектра по интенсивности с результатами других экспериментов лишний раз свидетельствует о корректности процедуры определения энергии ШАЛ.

Основная идея поиска диффузного гамма-излучения заключается в выделении ШАЛ с малым числом мюонов. За рассматриваемый период 2017-2021 гг и с учетом критериев отбора событий не было обнаружено кандидатов в фотонные события. Полученные ограничения на поток гамма-квантов находятся на уровне аналогичных измерений установок ШАЛ-МГУ, KASCADE-Grande и Pierre Auger Observatory.

В заключение перечислены основные результаты диссертации.

Можно отметить несколько недостатков диссертационной работы.

Во введении: на мой взгляд, следовало бы добавить, что важность исследования диапазона 10^{16} - 10^{18} эВ заключается не только в том, что это предполагаемая область перехода от галактических к внегалактическим КЛ, но и в том, что в этот диапазон могут вносить вклад новые источники галактических КЛ (В-компонента по выражению М.Хилласа).

В первой главе: в заключительном разделе главы следовало бы добавить несколько абзацев о возможной астрофизической интерпретации полученных результатов. Также хотелось бы увидеть отдельный раздел, посвященный описанию Якутской установки ШАЛ, так как ее область исследований (энергетический порог порядка $3 \cdot 10^{17}$ эВ) пересекается с энергетическим диапазоном изучаемым в диссертации.

В четвертой главе: к недостатку проведенного анализа следует отнести малую статистику рассматриваемых совместных событий, в особенности при энергии КЛ выше 10^{17} эВ.

В целом диссертация производит очень хорошее впечатление и приведенные выше замечания не умаляют ее качество. Прделана большая и серьезная работа. Можно надеяться, что в дальнейшем совместные измерения комплекса установок Тунка-133 и Tunka-Grande приведет к новым и интересным результатам при исследовании массового состава КЛ в диапазоне энергий 10^{16} - 10^{18} эВ.

Диссертация соответствует специальности **1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий**, а именно ее направлениям 4 и 13: «Техника и методика эксперимента в области физики атомных ядер и элементарных частиц и физики высоких энергий» и «Методы обработки и анализа экспериментальных данных в области физики атомных ядер и элементарных частиц и физики высоких энергий».

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности **1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий** (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным п.п. 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.**

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
заместитель директора по научной работе,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук



Рябов Владимир Алексеевич

Контактные данные:

тел.: +7(499)1326142, e-mail: ryabov@lebedev.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.04.23 - физика высоких энергий

Адрес места работы:

119991, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53

Тел.: +7(499) 132-61-42; e-mail: ryabov@lebedev.ru

Подпись

В.А. Рябова, доктора физико-математических наук, удостоверяю

Ученый секретарь ФИАН,
кандидат физико-математических наук

«23» ноября 2023 г.



А.В.Колобов