

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию  
Куджаева Александра Уружбековича  
на тему «Методы исследования проникающей компоненты ШАЛ на  
установке «Ковер-2» Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН»  
по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики –  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация посвящена разработке нового метода регистрации проникающих компонент широких атмосферных ливней (ШАЛ) (мюонной и адронной) с помощью установки «Ковер-2» БНО ИЯИ РАН. В настоящее время ШАЛ являются единственным источником информации о характеристиках потока первичных космических лучей (ПКЛ) в области энергий выше  $10^{15}$  эВ. ШАЛ формируются в результате развития ядерно-каскадного процесса при взаимодействии частиц ПКЛ с ядрами атомов атмосферы. В основе метода ШАЛ лежит решение обратной задачи: восстановление параметров ПКЛ (энергетический спектр, массовый состав) по откликам распределенных систем детекторов. Однако регистрируемые характеристики ШАЛ одновременно зависят от всех этих неизвестных и, кроме того, от моделей адрон-ядерных взаимодействий, параметры которых получаются на основе экстраполяции ускорительных данных в область сверхвысоких энергий, где такие данные отсутствуют. Важнейшими для получения информации о характеристиках ПКЛ, а также об особенностях адрон-ядерных взаимодействий, являются проникающие компоненты: мюонная и адронная. Если электронно-фотонная компонента формируется в основном за счет распадов нейтральных мезонов, то мюонная компонента несет информацию о каналах распада заряженных мезонов, а также, что важно при интерпретации результатов изучения ШАЛ, об особенностях взаимодействий в первых поколениях частиц ШАЛ. Адронная компонента, которая является «скелетом» ливня, сосредоточена в основном в стволе ливня и играет важную роль в получении оценок первичной энергии. Традиционно адроны ШАЛ изучаются с помощью ионизационных калориметров, ядерных эмульсий и рентгено-эмульсионных камер большой площади.

Одним из путей повышения достоверности оценок характеристик ПКЛ на основе метода ШАЛ является одновременная регистрация нескольких основных компонент с помощью одного экспериментального комплекса. В диссертации Куджаева А.У. обосновывается новый метод одновременной регистрации мюонной и адронной компонент с помощью экспериментального комплекса «Ковер-2» БНО ИЯИ РАН.

Несмотря на большое количество установок по изучению ШАЛ, адронная компонента изучалась лишь в немногих экспериментах, например Тянь-Шань, EAS-TOР, KASCADE и др. Предлагаемый автором метод отличается от традиционных методов и позволяет по-новому подойти к регистрации, анализу и интерпретации ШАЛ на основе данных одного детектора, что определяет **актуальность диссертации**.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Во введении автор обосновывает актуальность разработки нового метода исследования проникающих компонент ШАЛ, проводя анализ современного состояния исследований в этой области. Справедливо подчеркивается важность одновременной регистрации и анализа мюонной и адронной компонент при энергиях до и после «излома» энергетического спектра ПКЛ для понимания его природы.

В **первой главе** приводится обзор экспериментальных результатов по регистрации мюонной и адронной компонент, полученных в разное время на различных установках. Ретроспективный анализ проводится отдельно по мюонной и адронной компонентам

ШАЛ. Подчеркивается важность проведенных на ливневой установке ШАЛ МГУ исследований электронной и мюонной компонент ШАЛ. Совместный анализ и сопоставление с моделью адронных взаимодействий QGSJET позволили сделать ряд важных заключений о массовом составе ПКЛ. Также анализируются подходы и результаты исследований мюонной компоненты на установках Haverah Park, EAS-TOP, KASCADE, GRAPES-3, Тунка-133. Отдельно автором уделено большое внимание немногочисленным экспериментам по регистрации адронной компоненты. Подробно рассматриваются результаты эксперимента KASCADE, который позволял одновременно выделять электронно-фотонную, мюонную и адронную компоненты.

В конце главы автор делает вывод, что для решения проблемы излома необходимо измерять спектры по числу частиц всех ливневых компонент. Однако характеристики этих компонент модельно зависимы и, в определенной степени, генетически связаны. Без дополнительных знаний об особенностях адрон-ядерных взаимодействий при энергиях выше  $10^{15}$  эВ задача определения спектра и состава ПКЛ не решается.

**Вторая глава** посвящена описанию установки «Ковер-2».

В диссертации используются две части установки: собственно установка Ковер (для регистрации электромагнитной компоненты ШАЛ) и мюонный детектор (МД). Установка «Ковер» состоит из 400 жидкостных сцинтилляционных детекторов, равномерно покрывающих квадрат площадью  $196 \text{ м}^2$ . Динамический диапазон каждого детектора составляет 10-5000 релятивистских частиц (среднее энергосодержание 1 р.ч. -  $\epsilon_{\mu}=50 \text{ МэВ}$ ). Шесть выносных пунктов, предназначенных для определения направления прихода ШАЛ, расположены на расстояниях 30 м и 40 м от центра «Ковра». Площадь каждого выносного пункта  $9 \text{ м}^2$ . При попадании оси ШАЛ непосредственно в «Ковер» ливневые параметры измеряются с высокой точностью. Мюонный детектор состоит из 175 пластиковых сцинтилляционных детекторов площадью  $1 \text{ м}^2$  каждый, прикрепленных к потолку подземного туннеля с толщиной поглотителя  $500 \text{ г/см}^2$ , и представляет собой вытянутую плоскость размером  $5 \times 35 \text{ м}^2$ . Диапазон отдельного сцинтилляционного детектора составляет 0.5-100 р.ч. ( $\epsilon_{\mu}=10 \text{ МэВ}$ ). Расстояние между центрами Ковра и МД – 47 м.

В **третьей главе** обосновывается методика разделения мюонной и адронной компонент ШАЛ, регистрируемых на установке «Ковер-2». Автор показывает, что если мюонный детектор имеет большую непрерывную площадь и состоит из большого количества индивидуальных детекторов, способных измерять энергосодержание частиц, он может быть использован в качестве однослойного адронного детектора, так как толщина поглотителя над МД (около 20 радиационных единиц) достаточно велика для того, чтобы поглотить электромагнитную компоненту, а с другой стороны, данной толщины (всего лишь около 5 пробегов для взаимодействия) недостаточно для поглощения адронных каскадов. Поэтому каскады, рожденные идущими в составе ШАЛ адронами, развиваются в поглотителе над мюонным детектором и дают дополнительное энергосодержание в сцинтилляторе. Методика выделения каскадов была проверена с помощью моделирования (к сожалению, в диссертации не указано, на основе какого пакета). Доказательство надежности разделения мюонов и адронов в МД можно получить, измерив пробег поглощения компонент космических лучей, рождающих в МД события с различными энергосодержаниями. Это было сделано посредством измерения барометрического коэффициента для событий с различными порогами по энергосодержанию в МД. Если барометрический коэффициент  $\beta$  выражен в %/мб, то пробег для поглощения (в  $\text{г/см}^2$ ) может быть получен как  $L = -100\%/\beta$ . Таким образом, результаты проведенного анализа показывают, что события, рожденные в МД адронами ШАЛ, представляют собой пятна детекторов с большим (но зависящим от зенитного угла) локальным энергосодержанием. Автор обосновывает, что для событий, близких к вертикали, отбор пятен детекторов с локальным энергосодержанием  $>5$  р.ч. позволяет надежно отделить адроны с энергиями  $>$

25 ГэВ от мюонов. К сожалению, автором не приводятся данные по оценке вероятности имитации адронных каскадов каскадами, генерированными мюонами ШАЛ в поглотителе над мюонным детектором.

**Четвертая глава** посвящена изучению с помощью разработанного метода характеристик мюонной компоненты ШАЛ с энергиями выше 1 ГэВ и адронной компоненты с энергиями выше 25 ГэВ. Автором показано, что результаты расчета функции пространственного распределения (ФПР) мюонов, полученные для установки Ковер-2 с помощью программы CORSIKA для первичных протонов и ядер железа не противоречат экспериментальным данным, которые также находятся в согласии на качественном уровне с данными установок EAS-TOP, GRAPES-3, Akeno. Полученная зависимость среднего числа мюонов на ливень от полного числа частиц в ливне (для  $N_e = 10^5 - 10^6$ ) описывается степенным законом с показателем  $\alpha$ , который в пределах ошибок согласуется с показателем аналогичного спектра, измеренного на установке EAS-TOP, а также не противоречит результатам моделирования с помощью программы CORSIKA. Было получено качественное согласие дифференциальных спектров по числу мюонов на ливень, полученных на установке «Ковер-2» и ливневых установках EAS-TOP и KASCADE. Автором показано, что дифференциальный спектр энерговыделений адронов в пластическом сцинтилляторе и зависимость среднего числа адронов на ливень (при условии попадания в «Ковер»;  $N_e = 10^5 - 10^6$  и  $E_h > 25$  ГэВ) не противоречат результатам моделирования по программе CORSIKA, а полученные ФПР адронов в диапазоне расстояний 39 – 56 м от центра МД до оси ливня не противоречат результатам моделирования и находятся в качественном согласии с ФПР, полученными на адронном калориметре установки KASCADE.

На основе проделанного анализа экспериментальных данных по регистрации проникающих компонент на комплексной установке «Ковер-2» автор делает заключение о возможности регистрации адронов в составе ШАЛ, когда оси локализованы вблизи детектора.

**Научная новизна** диссертации определяется рядом результатов, важнейшими из которых являются создание в составе установки «Ковер-2» мюонного детектора большой площади ( $175 \text{ м}^2$ ) на основе пластических сцинтилляторов, а также разработка методики разделения мюонной и адронной проникающих компонент, применение которой позволило осуществить на одном детекторе исследование как мюонов, так и адронов ШАЛ.

**Практическая значимость** работы заключается в возможности использования предложенного подхода для новых ливневых установок, в которых одновременно будут регистрироваться электрон-фотонная, мюонная и адронная компоненты ШАЛ, что даст возможность значительно повысить информативность при интерпретации экспериментальных данных.

**Достоверность** полученных результатов обусловлена как применением современных методов обработки и анализа экспериментальных данных, так и опубликованием 4 работ в рецензируемых журналах. Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне. Вклад автора в представленные исследования является основным и определяющим.

Работа прошла достаточную **апробацию**. Результаты работы докладывались на семи международных конференциях. Всё вышесказанное свидетельствует о научной новизне и большой практической значимости данной диссертационной работы.

Результаты диссертационной работы могут найти применение в организациях, занимающихся исследованиями в области физики частиц и космических лучей: ИЯИ РАН, ФИАН, НИИЯФ МГУ и др.

По диссертации в целом можно сделать следующие замечания:

1. В тексте диссертации автором были допущены определенные небрежности и вольности, затрудняющие восприятие текста:
  - Во многих местах в единицах измерений [мВ], [МэВ] Вольт написан строчной буквой. Такая же картина и с единицей измерения [Гц].
  - В некоторых местах автор допускает вольные словосочетания: «Более неточный...», «пространственные частицы...», «адронный поток...» и др.
  - Низкое качество рисунков затрудняет восприятие информации.
  - В печатной версии диссертации отсутствует стр. 68, а между страницами 64 и 65 вставлен пустой лист.
  - На рис. 20 по оси абсцисс данные приведены в каналах АЦП, а в тексте пиковое значение распределения приведено в МэВ. В этом же месте приводится значение ширины на полувысоте для временного разрешения, график которого было бы неплохо показать в тексте.
  - На странице 46 диссертации (стр. 52 в pdf-версии, размещенной на сайте ИЯИ РАН) появляется устройство «годоскоп», затем «годоскоп амплитудного канала», краткое описание которого приводится через несколько страниц. Здесь же при описании работы регистрирующей системы МД автор использует сокращения ВЦП, ВАЦП, АЦП, которые, по-видимому, обозначают, если судить по приведенной схеме, одно и то же устройство.
2. Раздел 2.3 начинается с утверждения, что мюонные детекторы большой площади, работающие в составе установок ШАЛ, предназначенных для целей гамма-астрономии ультравысоких энергий, используются для снижения фона при поиске локальных источников КЛ. Это утверждение, в принципе верное (с оговоркой о локальных источниках гамма-излучения), не имеет отношения к теме диссертации.
3. Вызывает сомнение необходимость описания прототипа МД на жидком сцинтилляторе в пластиковых контейнерах. К существованию рассматриваемых в диссертации вопросов этот прототип, на мой взгляд, не имеет отношения.
4. В формуле (35) ошибка:  $N_h = N_h^\alpha$ . Должно быть:  $N_h \sim N_e^\alpha$ .
5. На рисунках 48 и 49 ошибки: в подписях осей ординат вместо плотности адронов приводится плотность мюонов.

Тем не менее, сделанные замечания не влияют на основные защищаемые положения и выводы диссертации.

### **Заключение**

Диссертация Куджаева Александра Уружбековича «Методы исследования проникающей компоненты ШАЛ на установке “Ковер-2” Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН» является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне. В работе приведены научные результаты, вносящие существенный вклад в развитие экспериментальных методов изучения характеристик ПКЛ на основе регистрации широких атмосферных ливней. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

По объему проведенных исследований и важности полученных результатов диссертация Куджаева А.У., представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а сам соискатель, Куджаев Александр Уружбекович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Доктор физико-математических наук,  
доцент НОЦ НЕВОД НИЯУ МИФИ

Яшин И.И.

23 сентября 2014 г.

Яшин Игорь Иванович  
115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31  
8(495)788-56-99 доб. 9252

[iyashin@mephi.ru](mailto:iyashin@mephi.ru)

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Доцент НОЦ НЕВОД НИЯУ МИФИ

Яшин Игорь Иванович

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Научно-образовательный центр НЕВОД, доцент,

доктор физико-математических наук, специальность 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

**Основные публикации по теме защищаемой диссертации за последние 5 лет:**

№ п/п	Наименование работы, её вид	Форма работы	Выходные данные	Объем, стр.	Соавторы
1	2	3	4	5	6
<b>Научные статьи в журналах базы Web of Science</b>					
1.	Multi-sector scintillation detector for investigations of extensive air showers.	Печатн.	Instr. and Meth. in Phys. Res. A, v. A598, no. 1, 2009, p. 296-299	4	E.E.Yanson, S.P.Denisov, Yu.V.Gilitsky, V.V.Kindin, R.P.Kokoulin, K.G.Kompaniets, V.V.Lipaev, A.A.Matyushin, A.V.Ovchinnikov, A.A.Petrukhin, N.N.Prokopenko, M.M.Soldatov, A.N.Sytin.
2	Measurements of the energy spectrum of cascade showers initiated by muons in the Cherenkov water calorimeter NEVOD	Печатн.	Journal of Physics Conference Series, Volume: 409, Article Number: 012134. 2013	4	Khokhlov, S. S.; Borshevsky, A. V.; Chernov, D. V.; Dmitrieva, A. N.; Dushkin, L. I.; Kindin, V. V.; Kokoulin, R. P.; Kompaniets, K. G.; Petrukhin, A.A.; Shutenko, V. V.; Zadeba, E. A.
3	NEVOD-DECOR experiment: results and future	Печатн.	Journal of Physics Conference Series, Volume: 409, Article Number: 012009. 2013	4	Saavedra, O.; Amelchakov, M. B.; Barbashina, N. S.; Bogdanov, A. G.; Chernov, D. V.; Chiavassa, A.; Dushkin, L. I.; Khokhlov, S. S.; Khomyakov, V. A.; Kindin, V. V.; Kokoulin, R. P.; Kompaniets, K. G.; Mannocchi, G.; Matveev, S. Yu; Petrukhin, A.A.; Shestakov, V. V.; Shulzhenko, I. A.; Shutenko, V. V.; Trincherо, G.; Zadeba, E. A.
4	Новый мюонный годоскоп для мониторинга гелиосферных и атмосферных возмущений.	Печатн.	Краткие сообщения по физике ФИАН. 2010. № 7. С. 43-46.	4	Н.В. Ампилогов, И.И. Астапов, Н.С. Барбашина, В.В. Борог, А.Н. Дмитриева, К.Г. Компаниец, А.А. Петрухин, Д.А. Тимашков, Д.В. Чернов, В.В. Шутенко, И.И. Яшин.
5	Исследование характеристик потока и	Печатн.	Ядерная физика, 2010, т. 73, № 11,	16	А.Г. Богданов, Д.М. Громушкин, Р.П. Кокоулин, Дж. Маннокки,

	взаимодействия космических лучей сверхвысоких энергий с помощью метода спектров локальной плотности мюонов.		с. 1904-1920.		А.А. Петрухин, О. Сааведра, Дж. Тринкоро, Д.В. Чернов, В.В. Шутенко
6	Local muon density spectra at large zenith angles as a probe of high-energy hadronic interaction models.	Печатн.	Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), 196 (2009) 106-109	4	R.P.Kokoulin, A.G.Bogdanov, G.Mannocchi, A.A.Petrukhin, O.Saavedra, V.V.Shutenko, G.Trincherо,
<b>Научные статьи в журналах базы Scopus</b>					
7	A novel type of EAS recording array: First results	Печатн.	Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 77 (5), pp. 635-637. 2013	3	Gromushkin, D.M., Alekseenko, V.V., Petrukhin, A.A., Stenkin, Yu.V., Stepanov, V.I., Shchegolev, O.V., Volchenko, V.I.,
8	Energy spectrum of cascade showers generated in water by near-horizontal muons	Печатн	Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 77 (5), pp. 638-640. 2013	3	Khokhlov, S.S., Barbashina, N.S., Bogdanov, A.G., Chernov, D.V., Dmitrieva, A.N., Dushkin, L.I., Kindin, V.V., Khomyakov, V.A., Kokoulin, R.P., Kompaniets, K.G., Kovylyayeva, E.A., Ovchinnikov, V.V., Petrukhin, A.A., Shutenko, V.V., Zadeba, E.A.,
9	Study of EAS neutron component temporal structure	Печатн.	Astrophysics and Space Sciences Transactions, 7 (2), pp. 115-117. 2011	3	Gromushkin, D.M., Petrukhin, A.A., Stenkin, Yu.V.
10	Intensity of muon bundles at large zenith angles and hadron interaction models at energy of $10^{18}$ eV	Печатн.	Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 75 (3), pp. 395-398. 2011	4	Kokoulin, R.P., Bogdanov, A.G., Gromushkin, D.M., Mannocchi, G., Saavedra, O., Petrukhin, A.A., Tolkacheva, N.V., Trincherо, G., Chernov, D.V., Shutenko, V.V.
11	Исследование формы энергетического спектра ПКИ методом локальной плотности мюонов ШАЛ	Печатн.	Известия РАН. Серия физическая, т. 73, № 5 (2009) с. 616-619.	4	И.И.Яшин, А.Г.Богданов, Д.М.Громушкин, Р.П.Кокоулин, Дж.Маннокки, А.А. Петрухин, О.Сааведра, Дж.Тринкоро, Д.В.Чернов, В.В.Шутенко..