

## ОТЗЫВ

официального оппонента Деденко Леонида Григорьевича на диссертационную работу И.С. Карпикова «Моделирование и анализ данных мюонного детектора эксперимента по исследованию космических лучей ШАЛ-МГУ», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Как известно, за последнее время существенное развитие получила экспериментальная база для детектирования космических лучей в области сверхвысоких энергий. Огромные уникальные установки Pierre Auger Observatory и Telescope Array позволяют детектировать широкие атмосферные ливни (ШАЛ), генерированные в атмосфере Земли частицами первичного космического излучения (ПКИ) с энергиями вплоть до  $\sim 10^{20}$  эВ. Калибровка энергии этих ливней по флуоресцентному свету позволяет существенно уменьшить погрешность оценки этой энергии. Заметное развитие получили и методы интерпретации экспериментальных данных. Стало возможным моделирование практически всех экспериментальных процессов и процедур. Это моделирование реализуется в рамках выбранных моделей взаимодействия адронов. В то же время еще остаются нерешенные до конца проблемы и в области энергий  $10^{16} - 10^{18}$  эВ. Для идентификации возможных источников космических лучей необходимы более достоверные данные о составе и энергетическом спектре частиц ПКИ в этой области энергий. Недостатки существующих моделей взаимодействия адронов, используемых для интерпретации экспериментальных данных, проявляются как погрешности оценок энергии и состава частиц ПКИ и других параметров ШАЛ. В настоящее время принято, что интерпретация экспериментальных данных должна сопровождаться моделированием ливней и аналогичной интерпретацией этих модельных ливней. Кроме оценок стандартных параметров состава и энергии частиц ПКИ, очень важны поиски новых физических явлений, например, ливней, генерированных первичными гамма

квантами. Именно эти важные проблемы разработки и реализации адекватных методов интерпретации данных и программных кодов, используемых для проверки моделей взаимодействия адронов и получения оценок состава частиц ПКИ, а также верхних оценок потока первичных гамма квантов в области энергий  $\sim 10^{16} - 10^{17.5}$  эВ на этом новом уровне интерпретации, и рассматриваются в диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложения, изложена на 103 страницах, включает много рисунков и таблиц и 83 ссылки на литературу.

Во введении обозначены современные проблемы физики космических лучей высоких и сверхвысоких энергий и астрофизики. Отмечаются особенности регистрации параметров ШАЛ. Особо выделяются флуктуации как фактор, который приводит к заметным неопределенностям результатов исследований. Утверждается, что такие параметры ШАЛ, как показатель наклона функции пространственного распределения (ФПР) заряженных частиц и число мюонов, зависят от состава частиц ПКИ. Отмечаются возможности известного программного пакета CORSIKA с большим набором подключаемых модулей и генераторов взаимодействия адронов для проведения такого моделирования. Для обоснования темы диссертации автор рассматривает известную проблему избытка мюонов, наблюдаемых в ШАЛ на некоторых крупнейших установках. Также подчеркивается важность поиска гамма-излучения сверхвысоких энергий. Автор также отмечает особенности и достоинства установки ШАЛ-МГУ, которые можно использовать для решения поставленных задач. Следует согласиться с автором, что тема диссертации актуальна, поскольку действительно необходимы более достоверные данные о составе частиц ПКИ и прояснение ряда важных астрофизических проблем. Совершенно понятна и цель работы, определенная диссертантом как создание полной компьютерной модели установки ШАЛ-МГУ, последующий анализ данных этой установки и получение физических результатов. Научная новизна работы состоит в том, что впервые проведено полное компьютерное моделирование установки

ШАЛ-МГУ и получены новые результаты о составе частиц ПКИ и пределы на поток гамма-излучения в области сверхвысоких энергий. Личный вклад автора определяется созданием библиотеки модельных ливней, получением оценок состава частиц ПКИ в области энергий  $10^{16.5} - 10^{17.75}$  эВ двумя независимыми методами, доказательством отсутствия избытка наблюдаемых мюонов по сравнению с модельными предсказаниями, и получение верхних пределов на потоки диффузного гамма-излучения в области энергий выше  $10^{16}$  эВ.

В конце введения указана структура диссертации, приведено распределение материала по главам, и перечень международных конференций, симпозиумов и рабочих совещаний, на которых соискателем докладывались результаты его работы, и ссылки на публикации автора.

В первой главе приводится описание установки ШАЛ-МГУ после ее модернизации. Рассматриваются расположения счетчиков Гейгера-Мюллера и сцинтилляционных счетчиков (триггерной системы), используемых для отбора ливней на основе заданных критериев, и процедура определения параметров ШАЛ и отбора событий. Определение параметров ШАЛ (процедура реконструкции) проводится сначала на основе ФПР заряженных частиц Нишимуры-Каматы-Грейзена, а затем – эмпирической ФПР. В результате реконструкции получаются оценки параметра  $S$  (по терминологии автора возраста ливня), характеризующего ФПР, зенитного угла  $\theta$ , расстояния  $R$  от центра установки до оси ливня и полного числа  $N_e$  заряженных частиц. Алгоритм моделирования включает создание библиотеки модельных ШАЛ от протонов и ядер железа, генерацию ливней, «упавших» на установку ШАЛ-МГУ, с помощью этой библиотеки, моделирование отклика детекторов на эти ливни и реконструкцию параметров ШАЛ по стандартной процедуре. Автор использует модели QGSJETII-04 и FLUKA2011.2c для моделирования взаимодействия адронов и модель EGS4 в случае электромагнитных взаимодействий частиц. Параметры положения оси ливня и направления прихода, оценки числа частиц, энергии и параметра возраста ливня примерно 5500 модельных ШАЛ от протонов и ядер железа и состава из этих ядер

сравниваются с экспериментальными данными примерно 1000 линий. Оказалось, что распределения параметра  $S$ , существенно зависят от состава частиц ПКИ. Это позволило автору оценить в рамках модели наилучший состав из 43% протонов и 57% ядер железа в модели из двух типов ядер. Полученные результаты – несомненное достижение диссертанта.

Во второй главе автор приводит результаты решения проблемы избытка мюонов. Уникальный детектор мюонов установки ШАЛ-МГУ, расположенный на глубине  $\sim 40$  м водного эквивалента, позволяет решить эту проблему с достаточной степенью уверенности. Диссертант приводит детальное описание детектора и процесса получения его отклика, плотности мюонов с энергией выше пороговой, равной  $\sim 10$  ГэВ. Эмпирическая ФПР таких мюонов, полученная в других работах, в пределах погрешности параметров формулы не противоречит результатам интерпретации автором как экспериментальных данных, так и модельных ливней. Это позволяет диссертанту использовать эту функцию для оценки значения плотности мюонов на расстоянии 100 м от оси ливня и получать распределения этого параметра. Автор рассматривает два метода интерпретации данных. Сначала, аналогично процедурам, рассмотренным в предыдущей главе, методом подгонки получается доля  $54 \pm 6\%$  железа в составе из двух компонент. Во втором случае модельные значения плотности, умножаются на коэффициент  $k$ , и распределения сравниваются с данными эксперимента. Минимум функции  $\chi^2(k)$  достигается при значении коэффициента  $k = 0.92 \pm 0.06$ . Можно согласиться с автором, что на уровне достоверности  $\sim 90\%$  избыток мюонов не наблюдается. Упрощенное моделирование в рамках других моделей также не показывает избытка мюонов. Нужно согласиться с высказыванием диссертанта, что факты наблюдений избытка мюонов на установках HiRes MIA, PAO и ЯКУШАЛ и отсутствия этого избытка по данным, полученным на установках IceTop и ШАЛ-МГУ, необходимо проверить в дополнительных исследованиях. Доля ядер железа, определенная по плотности мюонов, хорошо согласуется с величиной этой доли, определенной ранее по параметру  $S$ . В пределах погрешностей эта доля не противоречит оценкам,

полученным на установках KASCADE GRANDE и TUNKA 133.

В третьей главе рассматриваются новые интересные проблемы. Гамма кванты высоких и сверхвысоких энергий могут генерироваться в различных процессах. Обнаружение этих гамма квантов в ПКИ представляет значительный интерес для астрофизики. Сначала автор обсуждает возможные механизмы генерации гамма-излучения и особенности ливней, генерированных гамма квантами. По определению, кандидатами в искомые события считаются ливни, в которых не зарегистрировано ни одного мюона в подземном детекторе. В предыдущих предварительных исследованиях флуктуации плотности мюонов в ливнях от различных ядер, возможно, учитывались приближенно. Поэтому представляют большой интерес оценки потока гамма квантов, полученные методом полного моделирования установки ШАЛ\_МГУ. Для анализа автор использует ~3000 экспериментальных событий и ~27000 модельных ливней, генерированных из ~300 ливней от гамма квантов, которые имеются в библиотеке. Анализ показал, что число наблюдаемых событий без мюонов равно 86, а оценка фона от ливней от различных ядер – 83.5. Для оценки потока этих событий без мюонов вычисляются эффективность регистрации первичных гамма квантов и зависимость числа частиц в ливне от энергии гамма кванта. В результате И.С. Карпиковым получены и в таблице 3.1 приведены ограничения сверху на интегральные потоки диффузного гамма излучения в области энергий  $10^{16}$ - $10^{17.5}$  эВ.

В заключении приведены основные результаты, полученные диссертантом. И.С. Карпиковым разработана и реализована полная модель установки ШАЛ-МГУ, которая в пределах погрешностей ставит в соответствие параметрам экспериментальных событий их модельные аналоги. Двумя независимыми методами определена доля протонов, равная ~43% , в предполагаемом составе частиц ПКИ из протонов и ядер железа. Экспериментальные оценки плотности мюонов в ливнях с энергиями  $\sim 10^{17}$  эВ соответствуют расчетным в рамках модели QGSJETII-04. Получены наиболее строгие в мире ограничения сверху на потоки диффузного гамма

излучения с энергиями больше  $8 \cdot 10^{16}$  и  $10^{17}$  эВ, которые равны соответственно  $3.6 \cdot 10^{15}$  и  $3.9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ .

В приложении показано, что результаты экспериментальных распределений различных параметров ШАЛ хорошо совпадают с рассчитанными и в увеличенной области изменения основного параметра – числа частиц.

Достоверность результатов диссертации И.С. Карпикова, их новизна и актуальность не вызывают сомнений.

Основные результаты диссертации И.С. Карпикова опубликованы в 3 статьях (3 из списка ВАК) в высокорейтинговых международных журналах и российских изданиях, неоднократно докладывались лично автором на международных и всероссийских конференциях, симпозиумах и рабочих совещаниях.

К диссертационной работе И.С. Карпикова имеются некоторые замечания. Например, упоминая о калибровке моделей взаимодействия адронов на Большом адронном коллайдере, автор не приводит значения псевдобыстрот  $\eta \sim 0$  и  $\eta \sim 6$  в случае экспериментов соответственно ATLAS и TOTEM (см. стр. 6). В космических лучах развитие ШАЛ определяют частицы с максимальными энергиями, со значениями псевдобыстроты  $\eta \sim 8-10$ . Проверка в этой области значений псевдобыстрот показывает, что предсказания всех моделей для потока атмосферных мюонов примерно в два раза меньше экспериментальных данных. Возможно, по этой причине расчетные оценки энергии ШАЛ не совпадают с экспериментальными, определенными с использованием флуоресцентного света. Далее, в параграфе 1.4.3 (см. стр. 37) возрастом ливня  $S$  называется параметр аппроксимации пространственного распределения заряженных частиц в ШАЛ. Согласно известной стандартной каскадной теории в максимуме ливня от гамма кванта параметр возраста равен 1. До максимума развития этот параметр строго меньше 1, а за максимумом – строго больше 1. В этом и состоит смысл возраста. В случае широких атмосферных ливней ФПР заряженных частиц формируется каскадами от многих гамма квантов, рожденных на различных

глубинах с разными энергиями в атмосфере. В этом случае утрачивается соответствие параметра аппроксимации ФПР возрасту ливня и поэтому, как нам представляется, не следует этот параметр аппроксимации  $S$  называть возрастом. В обсуждении проблемы избытка мюонов (см. стр. 44) автор не останавливается на некоторых важных деталях регистрации мюонов. Во-первых, возникает вопрос, насколько точно определяется количество вещества и его состав над детектором мюонов? Во-вторых, обычно ограничиваются средними ионизационными потерями. Но в случае малых толщ вещества проявляются флуктуации ионизационных потерь (флуктуации Ландау). Расчеты с использованием пакета GEANT4 показывают, что пороговая энергия мюона для грунта, толщина которого равна 40 м водного эквивалента, уменьшается от значения 10 ГэВ, определенного по средним потерям, до  $\sim 9$  ГэВ. В случае толщи 4 м водного эквивалента – соответственно от 1 ГэВ до 0.7 ГэВ. Для толщи грунта 2.5 м – от 1 ГэВ до 0.65 ГэВ. Поток мюонов в ШАЛ увеличивается с уменьшением энергии. Поэтому уменьшение порога приводит к увеличению наблюдаемого числа мюонов.

Сделанные выше замечания не носят принципиального характера и не могут повлиять на высокую оценку диссертационной работы.

Автореферат диссертации полностью соответствует ее полному тексту. Результаты диссертации могут быть использованы в ИЯИ РАН, НИИЯФ МГУ, НИЯУ МИФИ, ОИЯИ, ИКФИА, Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН и Курчатовском центре ИТЭФ и в других отечественных и зарубежных институтах и лабораториях.

Диссертационная работа Карпикова Ивана Сергеевича «Моделирование и анализ данных мюонного детектора эксперимента по исследованию космических лучей ШАЛ МГУ», выполнена на высоком научном уровне, представляет собой законченную научно-квалификационную работу и удовлетворяет всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор,

Карпиков Иван Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Профессор кафедры общей физики физического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,

доктор физико-математических наук,

профессор /Деденко Леонид Григорьевич/

28 августа 2017 г.

Адрес:

119991, Москва, Ленинские Горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, дом 1, строение 2, физический факультет,

Тел. 8-495-939-14-89

e-mail: [ddn@dec1.sinp.msu.ru](mailto:ddn@dec1.sinp.msu.ru)

Подпись Л.Г. Деденко удостоверяю:

Декан физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,

Профессор

/Сысоев Н.Н./



Деденко Леонид Григорьевич доктор физико-математических наук,  
профессор.

Физика, специальность: 01.04.16 - Физика атомного ядра и  
элементарных частиц.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования Московский государственный  
университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра общей  
физики, профессор.

Список основных публикаций по теме диссертации за 2012-2017 гг.:

**1. Constraints of hadronic interaction models from the cosmic muon observations**

L. G. Dedenko, A. V. Lukyashin, G. F. Fedorova and T. M. Roganova.  
arXiv:1504.05853 [astro-ph.HE] EPJ Web Conf. 99, 10003 (2015)  
DOI:10.1051/epjconf/20159910003

**2. Тестовые эксперименты по мюонной радиографии в России на основе эмульсионных трековых детекторов**

А. Б. Александров, В. И. Галкин, Л. Г. Деденко и др..  
Письма в журнал "Физика элементарных частиц и атомного ядра" 12, No 5,  
196 (2015).

**3. Testing model energy spectra of charged particles produced in hadron interactions on the basis of atmospheric muons**

L. G. Dedenko, T. M. Roganova and G. F. Fedorova.  
Phys. Atom. Nucl. 78, no. 7, 840 (2015), [Yad. Fiz. 78, no. 10, 894 (2015)].  
DOI:10.1134/S1063778815060083

**4. Prospects of the study of geological structures by muon radiography based on emulsion track detectors**

L. G. Dedenko et al..  
Bull. Lebedev Phys. Inst. 41, no. 8, 235 (2014).  
DOI:10.3103/S1068335614080065

**5. Test of hadron interaction models in the most important energy range of secondary particles in spectra of atmospheric muons**

L. G. Dedenko, T. M. Roganova and G. F. Fedorova.  
JETP Lett. 100, no. 4, 223 (2014), [Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 100, no. 4, 247  
(2014)]. DOI:10.1134/S002136401416005X

**6. Possible composition of the primary particles at ultrahigh energies observed at the Yakutsk array**

L. G. Dedenko et al..  
J. Phys. Conf. Series 409, no. 1, 2068-2071 (2013).

**7. Units of signals in the surface and underground scintillation detectors of the Yakutsk array**

L. G. Dedenko, Fedorova G. F., Roganova T. M.

J. Phys. Conf. Series 409, no. 1, 2093-2096 (2013).

**8. The composition of the primary particles at energies  $3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{19}$  eV observed at the Yakutsk array**

L. G. Dedenko et al..

J. Phys. G 39, 095202 (2012). DOI:10.1088/0954-3899/39/9/095202