

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи

Юрина Екатерина Александровна

**Энергетические характеристики групп мюонов в наклонных ШАЛ по данным
эксперимента НЕВОД-ДЕКОР**

Специальность 01.04.23 – Физика высоких энергий

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

**Научный
руководитель:**

Кокоулин Ростислав Павлович,
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник Научно-образовательного центра
НЕВОД Национального исследовательского ядерного
университета «МИФИ»

**Официальные
оппоненты:**

Рубцов Григорий Игоревич,
доктор физико-математических наук, профессор РАН, заместитель
директора по научной работе Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований
Российской академии наук

Галкин Владимир Игоревич,
доктор физико-математических наук, доцент,
профессор физического факультета федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова»

Топчиев Николай Петрович,
доктор физико-математических наук, высококвалифицированный
ведущий научный сотрудник лаборатории гамма-астрономии
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физического института имени П.Н. Лебедева Российской академии
наук

Защита состоится «08» декабря 2021 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета МИФИ.01.01 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте: <https://ds.mephi.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета МИФИ.01.01, д.ф.-м.н., профессор



С.Е. Улин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

О наблюдении избытка мюонов в широких атмосферных ливнях (ШАЛ) относительно предсказаний моделей сообщалось авторами многих экспериментов. Фактически ни одна из моделей адронных взаимодействий, настроенных по доступным данным Большого адронного коллайдера (БАК), не может описать образование мюонов для первичных энергий выше 10^{17} эВ. Наблюдаемый избыток мюонов получил название “мюонная загадка” [1].

Важно отметить, что одним из первых экспериментов, на котором была измерена зависимость избытка мюонов от энергии частиц первичных космических лучей (ПКЛ), являлся НЕВОД-ДЕКОР [2, 3, 4]. Позже измерения, проведенные в Обсерватории Пьер Оже [5, 6, 7], подтвердили наличие избытка многомюонных событий в ШАЛ по сравнению с расчетами для энергий ПКЛ $10^{18} - 10^{19}$ эВ.

Наблюдаемый избыток может быть объяснен как космофизическими (изменение энергетического спектра и/или массового состава ПКЛ), так и ядернофизическими (генерация новых частиц или состояний материи в ядро-ядерных взаимодействиях) причинами. Для их разделения необходимо измерить энергетические характеристики многомюонных событий и их изменения с энергией первичных частиц. Возможным подходом к исследованию энергетических характеристик мюонной компоненты ШАЛ является измерение энерговыделения мюонных групп в веществе детектора. Средние потери мюонов в веществе практически линейно зависят от их энергии:

$$-dE_{\mu} / dX = a + bE_{\mu} . \quad (1)$$

Первое слагаемое в формуле, которое слабо зависит от энергии мюонов, отвечает за ионизационные потери, а второе слагаемое – за радиационные потери, которые растут с энергией мюонов. Соответственно, удельное энерговыделение (нормированное на плотность мюонов в группе) дает информацию о средней энергии мюонов в группах.

В случае утяжеления массового состава ПКЛ удельное энерговыделение слабо изменится. В случае включения нового физического процесса и появления мюонов высоких энергий удельное энерговыделение начнет расти, т. к. появление даже одного мюона с энергией, в сотни раз превышающей среднюю энергию мюонов, существенно увеличит среднее энерговыделение.

В эксперименте НЕВОД-ДЕКОР исследования энерговыделения групп мюонов в веществе детектора проводятся с 2012. Измерения энерговыделения групп мюонов в наклонных ШАЛ выполняются с помощью черенковского водного калориметра (ЧВК) НЕВОД [8, 9], а координатно-трековый детектор ДЕКОР [10] позволяет измерять множественность (количество мюонов в группе), направление прихода группы (зенитный и азимутальный углы) и локальную плотность мюонов, что дает возможность оценить энергию первичной частицы.

Цель работы

Поиск решения “мюонной загадки” – растущего с энергией первичных частиц избытка мюонов в ШАЛ в области выше 10^{17} эВ – путем исследования энергетических характеристик групп мюонов по данным детекторов НЕВОД и ДЕКОР.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Отобраны группы мюонов и обработаны экспериментальные данные по энерговыделению групп за длительный период времени (более 7 лет измерений).
2. Проверена стабильность работы черенковского водного калориметра НЕВОД и координатно-трекового детектора ДЕКОР.
3. Проведено моделирование отклика детекторов НЕВОД и ДЕКОР на прохождение групп мюонов.
4. Рассчитаны ожидаемые зависимости средних энергий мюонов в группах для различных моделей взаимодействий адронов и при разном составе ПКЛ.
5. Получены экспериментальные зависимости средних значений и медиан удельного энерговыделения, средней энергии мюонов в группах от зенитного угла и локальной плотности мюонов и соответствующих им энергий первичных частиц.
6. Полученные зависимости энергий мюонов в группах сопоставлены с расчетами ожидаемых значений для различных предположений о составе космического излучения и моделях адронных взаимодействий.

Научная новизна

Впервые измерено энерговыделение групп мюонов с одновременным определением количества мюонов и получены экспериментальные оценки средней энергии мюонов в группах в наклонных ШАЛ при зенитных углах от 55° до 85° , генерируемых ПКЛ с энергиями от 10 до 1000 ПэВ.

Впервые в интервале зенитных углов $65^\circ - 75^\circ$ для локальных плотностей более 0.4 мюонов/ m^2 , соответствующих энергиям первичных частиц выше 10^{17} эВ, обнаружено увеличение средней энергии мюонов в группах по сравнению с результатами расчета с использованием post-LHC моделей адронных взаимодействий.

Практическая значимость

Полученные в работе экспериментальные данные по энергетическим характеристикам многомюонных событий являются основой для проверки различных моделей образования избытка групп мюонов и разделения космофизической и ядернофизической причин его появления.

Личный вклад

Все работы по диссертации были осуществлены лично автором, либо при его непосредственном участии:

1. Обработка экспериментальных данных по энерговыделению групп мюонов за период более 7 лет наблюдений.
2. Моделирование прохождения групп мюонов через супермодули координатно-трекового детектора ДЕКОР.

3. Получение экспериментальных зависимостей энергетических характеристик многомюонных событий от зенитного угла и локальной плотности мюонов: средних и медиан удельного энергосодержания групп, средней энергии мюонов в группах.
4. Определяющий вклад в подготовку и оформление результатов по теме диссертации в виде научных докладов и публикаций.

Положения и результаты, выносимые на защиту

1. Реализация подхода к исследованию энергетических характеристик групп мюонов, основанного на измерении энергосодержания групп мюонов в черенковском водном калориметре НЕВОД с одновременным определением числа мюонов в группах и направления их прихода в широком диапазоне зенитных углов по данным координатно-трекового детектора ДЕКОР.
2. Результаты моделирования прохождения групп мюонов через супермодули детектора ДЕКОР для расчета поправок к оценке локальной плотности мюонов, учитывающих особенности регистрации событий детектором.
3. Результаты измерения энергосодержания групп мюонов и оценки средней энергии мюонов в группах в наклонных ШАЛ для энергий ПКЛ от 10 до 1000 ПэВ.
4. Увеличение среднего удельного энергосодержания и средней энергии мюонов в группах с ростом зенитного угла, согласующееся с результатами расчетов по моделям адронных взаимодействий QGSJET-II-04 и SIBYLL-2.3с.
5. Выявленный рост средней энергии мюонов в группах по сравнению с ожиданием для больших локальных плотностей, соответствующих энергиям ПКЛ выше 10^{17} эВ (для диапазона зенитных углов $65^\circ - 75^\circ$).

Достоверность

Достоверность экспериментальных результатов определяется большой статистической обеспеченностью данных (90 тыс. событий с группами мюонов, отобранных независимыми операторами), а также использованием современных методов обработки данных. Достоверность данных по энергосодержаниям групп мюонов подтверждается долговременной стабильностью работы детектора ДЕКОР и черенковского водного калориметра НЕВОД. Абсолютная величина отклика ЧВК НЕВОД откалибрована с помощью одиночных околоризонтальных мюонов, отобранных с помощью ДЕКОР.

Апробация результатов работы

Основные результаты исследований по теме диссертации представлены автором на российских и международных конференциях: 7-й Международной молодежной научной школе-конференции «Современные проблемы физики и технологий» (2018); 26th Extended European Cosmic Ray Symposium / 35th Russian Cosmic Ray Conference (2018); 36-й Всероссийской конференции по космическим лучам (ВККЛ-2020); 2nd International Symposium on Cosmic Rays and Astrophysics (ISCRA-2019); 13-х Черенковских чтениях «Новые методы в экспериментальной ядерной физике и физике частиц» (2020); 5th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2020); 37th International Cosmic Ray Conference (ICRC-2021).

Основные положения диссертации опубликованы в 12 работах в изданиях, индексируемых базами данных Scopus, Web of Science и/или входящих в Перечень ВАК. В

составе коллектива авторов получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности (№ 2020612359 от 20.02.2020).

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и одного приложения. Объем диссертации: 112 страниц, 69 рисунков, 10 таблиц, 79 наименований цитируемой литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность и новизна исследуемой научной проблемы – “мюонной загадки” – растущего с энергией первичных частиц избытка мюонов по сравнению с результатами расчета. Представлены цель и задачи исследования данной проблемы путем изучения энергетических характеристик групп мюонов (энерговыведения, энергии мюонов в группах). Приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор литературы по экспериментам, в которых наблюдался избыток многомюонных событий в ШАЛ по сравнению с расчетами.

Избыточное количество мюонов было надежно установлено в экспериментах ALEPH [11] и DELPHI [12], проводившихся на большом электрон-позитронном коллайдере LEP, ускорителе заряженных частиц в CERN. На рис. 1 представлены интегральные распределения множественности мюонов (количества мюонов в группе) для этих двух экспериментов. Данные сопоставлены с результатами моделирования ШАЛ в программном пакете CORSIKA [13]. Для больших множественностей (> 100) наблюдался избыток по сравнению с результатами моделирования как для протонного, так и для железного состава ПКЛ. У этих экспериментов был существенный недостаток – у них не было возможности оценивать энергию первичных частиц, при которых появляется избыток мюонов.

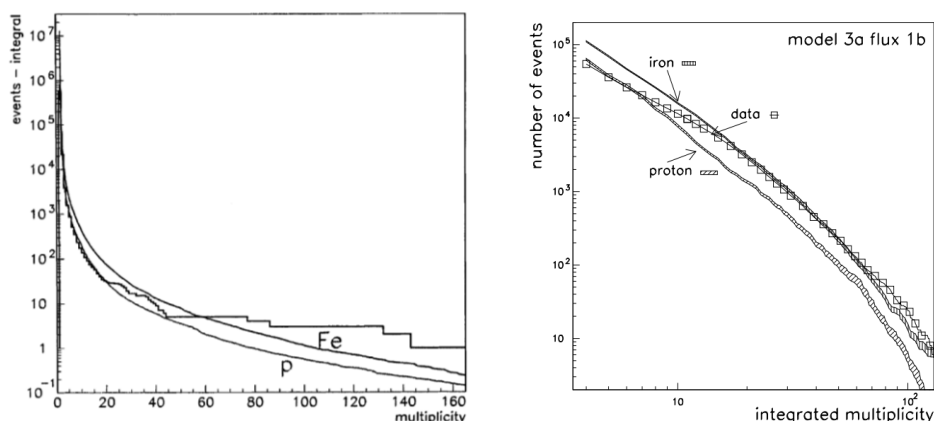


Рис. 1. Интегральные распределения множественности мюонов в сравнении с результатами моделирования в программном пакете CORSIKA для p и Fe: в эксперименте ALEPH (слева) и DELPHI (справа).

Такая возможность есть у установок, предназначенных для исследования космических лучей и оснащённых ливневыми установками для определения энергии первичной частицы, вызвавшей этот ливень. Но для надёжной регистрации групп мюонов

необходимо ещё одно условие: хорошее координатное разрешение мюонных детекторов. Первым экспериментом, в котором была обеспечена хорошая пространственная точность регистрации мюонов в группах (порядка 1 см) и был применён оригинальный подход к оценке энергии первичных частиц, стал комплекс НЕВОД-ДЕКОР, который позволил провести исследования групп мюонов от первичных частиц с энергией от 10^{15} до 10^{18} эВ и выше. Такой диапазон был достигнут за счет регистрации многомюонных событий в наклонных ливнях в широком диапазоне зенитных углов. Исследование групп мюонов ШАЛ в эксперименте ДЕКОР проводилось на основе метода спектров локальной плотности мюонов (СЛПМ). На рис. 2 приведены СЛПМ, помноженные для наглядности на D^3 , полученные на статистике групп мюонов, зарегистрированных детектором ДЕКОР за 2002-2007 и 2012-2016 годы [3]. Суммарное живое время наблюдений составило 41209 часов. Проведено сравнение полученных дифференциальных спектров с различными моделями адронных взаимодействий (EPOS LHC [14], QGSJET 01 [15], QGSJET-II-04 [16, 17], SIBYLL 2.1 [18], SIBYLL 2.3 [19]) для зенитного угла 78 градусов. Нижняя группа кривых на рисунках соответствует первичным протонам, а верхняя – ядрам железа. При энергиях около 10^{18} эВ наблюдается явный избыток групп мюонов, даже в предположении об экстремально тяжелом массовом составе ПКЛ (только ядра железа).

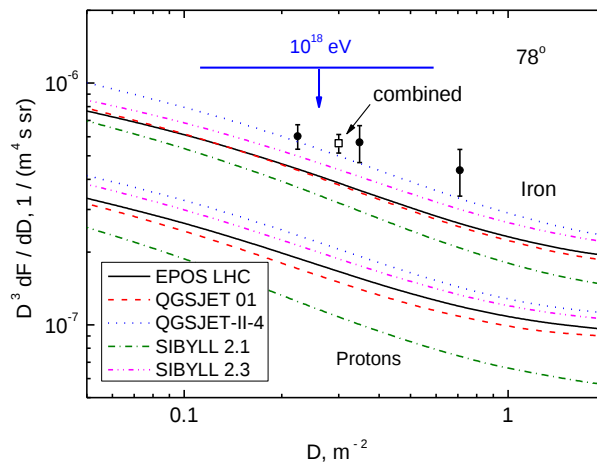


Рис. 2. Дифференциальные СЛПМ для зенитного угла $\theta = 78^\circ$. Данные обозначены точками; расчетные значения для пяти моделей адронных взаимодействий для первичных протонов и железа представлены кривыми.

Позже наличие избытка мюонов в наклонных ШАЛ при сверхвысоких энергиях было подтверждено в экспериментах Обсерватории Пьер Оже. Обсерватория Пьер Оже – два массива детекторов для регистрации ШАЛ, расположенных в Южном полушарии (Мендоза, Аргентина). В установке использована комбинация двух типов детекторов – черенковских водных, в которых измеряется число заряженных частиц, и оптических, регистрирующих флуоресцентный свет в атмосфере. Энергия ШАЛ измерялась флуоресцентным методом. На рис. 3 приведена зависимость среднего содержания мюонов в ливнях от энергии ШАЛ в дважды логарифмическом масштабе, полученная по событиям ШАЛ с зенитными углами $\theta > 62^\circ$ в диапазоне энергий первичных частиц от 3×10^{18} эВ до 3×10^{19} эВ [6]. Данные представлены черными кружками; квадратными скобками обозначены систематические неопределенности измерений. Данные сопоставлены с

ожидаемыми кривыми, полученными при моделировании ШАЛ для $\theta = 67^\circ$ для первичных протонов и ядер железа. Из рисунка видно увеличение избытка мюонов с ростом энергии ШАЛ.

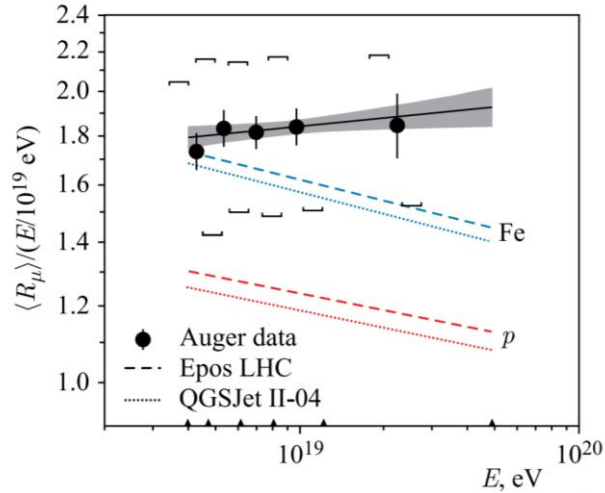


Рис. 3. Зависимость среднего содержания мюонов (отнесенного к энергии ливня) от энергии ШАЛ в дважды логарифмическом масштабе.

Международная рабочая группа WHISP свела воедино результаты практически всех имеющихся экспериментов [20, 21] для шести наиболее популярных моделей, используемых в программе CORSIKA. На рис. 4 показаны объединенные результаты по анализу “мюонной загадки”, включающие данные экспериментов NEVOD-DECOR [2, 3], Pierre Auger [6, 7], EAS-MSU [22], KASCADE-Grande [23], AMIGA [24], SUGAR [25], Telescope Array [26], IceCube [27], Yakutsk [28].

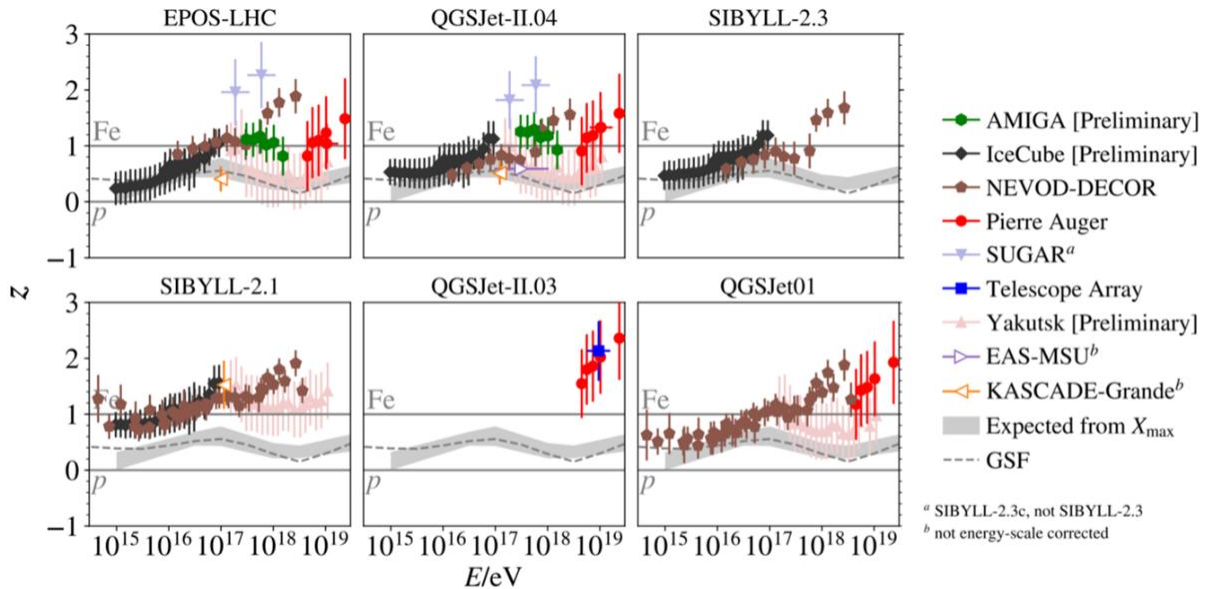


Рис. 4. Объединенные результаты по анализу “мюонной загадки”.

Для сравнения результатов различных экспериментов использовался безразмерный параметр:

$$z = \frac{\ln N_{\mu}^{\text{exp}} - \ln N_{\mu p}^{\text{sim}}}{\ln N_{\mu \text{Fe}}^{\text{sim}} - \ln N_{\mu p}^{\text{sim}}}, \quad (2)$$

где N_{μ}^{exp} – результат измерений множественности, плотности мюонов и т. п., $N_{\mu p}^{\text{sim}}$ и $N_{\mu \text{Fe}}^{\text{sim}}$ – результат моделирования той же величины при двух предположениях о составе первичного космического излучения: протоны и ядра железа. По определению, если данные близки к расчетам для протонов, то $z \approx 0$; в случае соответствия данных расчетам для предельно тяжелого состава (ядра железа) $z \approx 1$.

Если посмотреть на рисунки, при энергиях первичных частиц выше 10^{17} эВ для ряда экспериментов наблюдается сильный рост z -параметра с увеличением энергии первичных частиц по сравнению с ожиданием, полученным по данным измерения глубины максимума развития ливней X_{max} (серые полосы на рисунках) для различных моделей адронных взаимодействий, в том числе более $z = 1$, соответствующего предположению о тяжелом массовом составе ПКЛ.

Во второй главе представлено описание экспериментальной установки и данных серий измерений, процедуры отбора событий с группами мюонов и одиночных окологоризонтальных мюонов. Описана проверка долговременной стабильности координатно-трекового детектора ДЕКОР на основе анализа групп малой плотности. Приведены результаты анализа феноменологических характеристик групп мюонов.

Для изучения энергетических характеристик групп мюонов используются экспериментальные данные, получаемые на установках черенковский водный калориметр НЕВОД объемом 2000 м^3 и координатно-трековый детектор ДЕКОР площадью 70 м^2 Экспериментального комплекса НЕВОД (см. рис. 5).

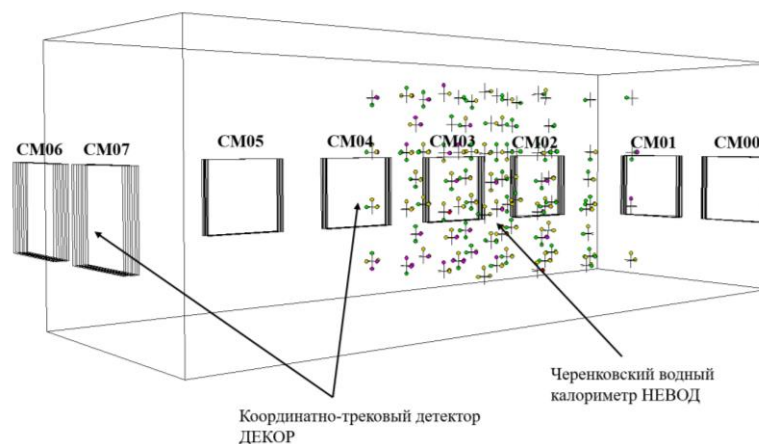


Рис. 5. Общий вид комплекса НЕВОД-ДЕКОР. Кружки – сработавшие ФЭУ в черенковском водном калориметре НЕВОД, большие прямоугольники – супермодули детектора ДЕКОР.

Квазисферический модуль (КСМ) является основным регистрирующим элементом ЧВК НЕВОД и включает 6 фотоумножителей типа ФЭУ-200 с плоским фотокатодом, направленных по осям ортогональной системы координат. Измерительная система ЧВК НЕВОД включает 91 КСМ, размещенных в виде объемно-центрированной решетки,

включающей по 7 плоскостей в направлении каждой из координатных осей. Динамический диапазон регистрирующей электроники составляет от 1 до 10^5 фотоэлектронов (ф.э.) для каждого ФЭУ благодаря применению двухдинодного съема информации. На рис. 5 сработавшие КСМ в бассейне обозначены крестиками, а сработавшие ФЭУ в виде окрашенных кружков.

Конфигурация установки ДЕКОР имеет модульную структуру и состоит из 8 супермодулей (СМ), находящихся в галереях здания ЭК НЕВОД вокруг водного резервуара (см. рис. 5). СМ площадью 8.4 м^2 представляет собой сборку из 8 плоскостей стримерных трубок. В свою очередь каждая плоскость состоит из 16 камер, каждая из которых включает 16 газоразрядных трубок сечением 1 см^2 , работающих в режиме ограниченного стримера. К каждой плоскости СМ прикреплены внешние горизонтальные и вертикальные металлизированные пластины с полосками (стрипами), с которых производится двухкоординатный (X , Y) съём информации. Стрипы, направленные вдоль камер, составляют “ X ”-плоскость, а стрипы, направленные поперек камер, – “ Y ”-плоскость. Угловая и пространственная точности реконструкции мюонных треков, пересекающих СМ, лучше 1 градуса и 1 см, соответственно. Суммарное число каналов регистрации составляет 32768.

Для отбора событий с группами мюонов в координатном детекторе ДЕКОР используется триггер TrD2 – совпадение сигналов от трех любых супермодулей ДЕКОР в пределах временных ворот 250 нс. Необходимо выполнение еще одного условия триггирования: для триггирования СМ достаточно, чтобы хотя бы один или любая комбинация прошедших через СМ частиц обеспечили выполнение условия срабатывания любых двух четных и двух нечетных плоскостей в Y -проекции. Далее, в режиме офлайн, проводится мягкий программный отбор событий-кандидатов, содержащих не менее трех квазипараллельных треков, зарегистрированных в трех из шести СМ ДЕКОР, экранированных водным бассейном. Дальнейшая процедура отбора групп выполняется операторами с помощью специальной программы интерфейса. Сначала отбираются события с множественностью не менее заданной в выбранных интервалах зенитного и азимутального углов, а затем проводится окончательная классификация событий и подсчет числа мюонных треков. В результате формируются списки, содержащие номера событий, число мюонных треков, углы прихода группы и др. информацию.

На рис. 6 приведен пример зарегистрированной группы мюонов. Черными точками обозначены сработавшие каналы детектора ДЕКОР. Справа – X -проекция, проекционный зенитный угол; слева – Y -проекция, азимутальный угол. Отчетливо видны квазипараллельные треки мюонов. На рис. 7 представлена визуализация восстановленных треков мюонов группы в детекторе ДЕКОР, а также отклик черенковского калориметра НЕВОД.

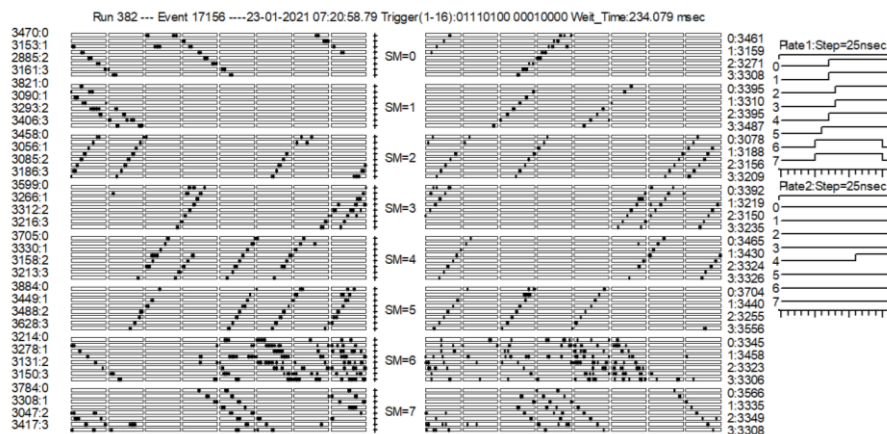


Рис. 6. Пример зарегистрированной супермодулями детектора ДЕКОР группы мюонов.

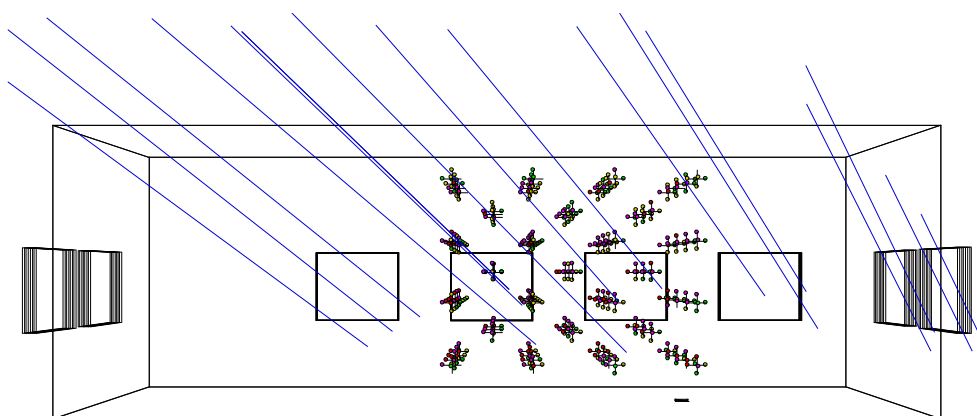


Рис. 7. Визуализация реконструированных треков мюонов, зарегистрированных детекторами ДЕКОР и ЧВК НЕВОД.

Отбор событий с одиночными околоразрывными мюонами осуществляется с помощью триггера TrD3 – срабатывание противоположно расположенных вдоль коротких галерей супермодулей детектора ДЕКОР (с торцов бассейна) из групп СМ00, СМ01; СМ06, СМ07. Расположение этих супермодулей показано на рис. 5. Для анализа брались события, в которых сработали только два СМ, а треки, реконструированные на основе сигналов с отдельных СМ, согласуются в пределах конуса с раствором меньше 5° . Тогда полагалось, что через оба СМ прошел один мюон, и соответственно за трек мюона принималась прямая, которая соединяла середины треков в СМ. Направление прихода одиночного околоразрывного мюона определялось по разнице времен срабатывания отдельных СМ и направлению черенковского излучения. На рис. 8 приведен пример зарегистрированного в СМ01 и СМ06 детектора ДЕКОР одиночного околоразрывного мюона, а на рис. 9 приведена визуализация этого события в бассейне НЕВОД; видны сработавшие ФЭУ КСМ, а также противоположные супермодули координатного детектора. Такие мюоны использовались для калибровки модели ЧВК НЕВОД. Описание процедуры калибровки приведено в главе 4.

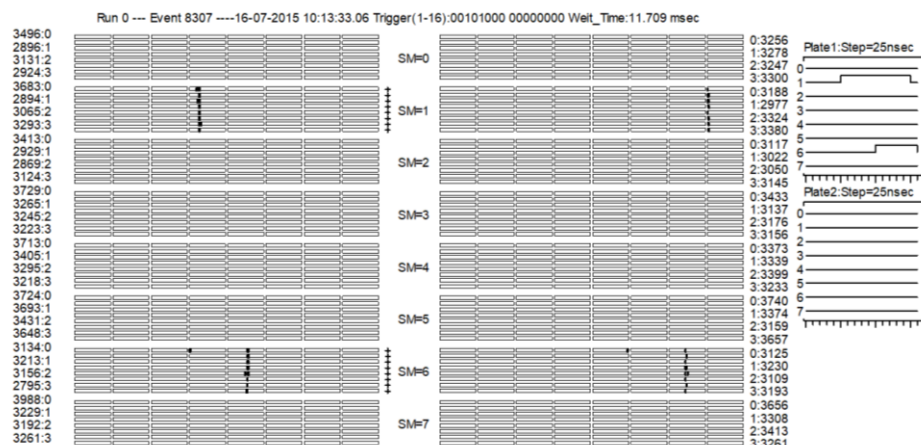


Рис. 8. Пример зарегистрированного одиночного мюона СМ ДЕКОР.

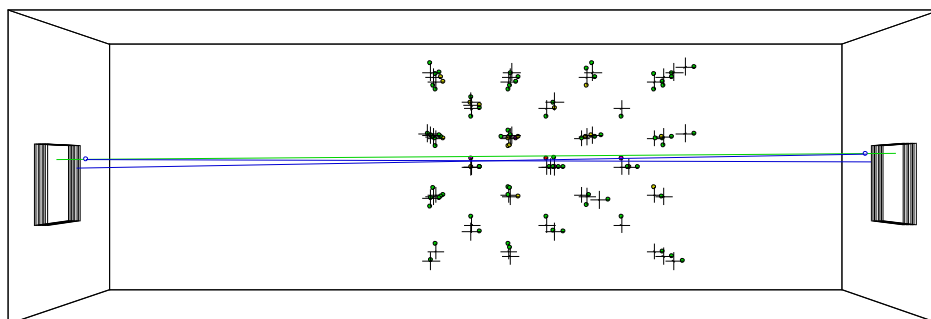


Рис. 9. Визуализация реконструированного одиночного мюона, зарегистрированного детекторами ДЕКОР и ЧВК НЕВОД.

Для обработки и анализа данных по группам мюонов использовались данные четырех серий измерений: 10-я серия (с 3 мая 2012 г. по 13 марта 2013 г.), 11-я серия (с 5 июля 2013 г. по 8 апреля 2015 г.), самая длительная 12-я серия (с 16 июля 2015 г. по 13 апреля 2019 г.), 13-я серия (с 24 апреля 2019 г. по 10 марта 2021 г.).

В результате анализа данных детектора ДЕКОР 10-й, 11-й и 12-й серий измерений по группам мюонов малой плотности (множественность $m \geq 3$) с зенитными углами $\theta = 15^\circ - 75^\circ$ продемонстрирована долговременная стабильность регистрации групп на детекторе ДЕКОР. Отличие отношения частот регистрации групп мюонов между сериями измерений не превышает 1.7 %, а после введения поправки на влияние атмосферных эффектов не более 1 %.

Для получения основных зависимостей энергетических характеристик групп мюонов использовались данные, начиная с 11-й серии измерений, когда была введена в строй новая системы водоочистки (при этом светосбор черенковского излучения был улучшен примерно вдвое). События 10-й серии были исключены, чтобы условия измерения отклика черенковского калориметра НЕВОД на события с группами были идентичны.

Обработана основная статистика данных трех серий измерений с группами мюонов с зенитными углами $\theta \geq 55^\circ$ в двух секторах по азимуту ($105^\circ \leq \varphi < 165^\circ$ и $195^\circ \leq \varphi < 255^\circ$), где шесть из восьми СМ экранированы водным объемом, и множественностью $m \geq 5$ в период стабильной работы детекторов НЕВОД и ДЕКОР в полной конфигурации (90 тыс.

событий, 53 тыс. ч живого времени). При зенитных углах меньше 55° помимо мюонов есть вклад сопровождения от электронно-фотонной и адронной компонент ШАЛ в отклик ЧВК НЕВОД, чем и обусловлен выбор границы $\theta \geq 55^\circ$. Для оценки влияния сопровождения дополнительно была обработана статистика с группами с зенитными углами $\theta = 40^\circ - 55^\circ$ 12-й серии за 3 тыс. ч живого времени.

На рис. 10 (слева) представлено дифференциальное распределение по множественности мюонов. Заметно, что события с множественностью $m = 5 - 6$ составляют большинство, тогда как события с $m = 7 - 9$ встречаются приблизительно в два раза реже. При значениях $m \geq 40$ наблюдается значительный разброс точек в связи с небольшой статистикой событий в данной области. На рис. 10 (справа) представлена зависимость числа событий от зенитного угла для различных порогов по множественности. При увеличении зенитного угла количество групп мюонов резко уменьшается.

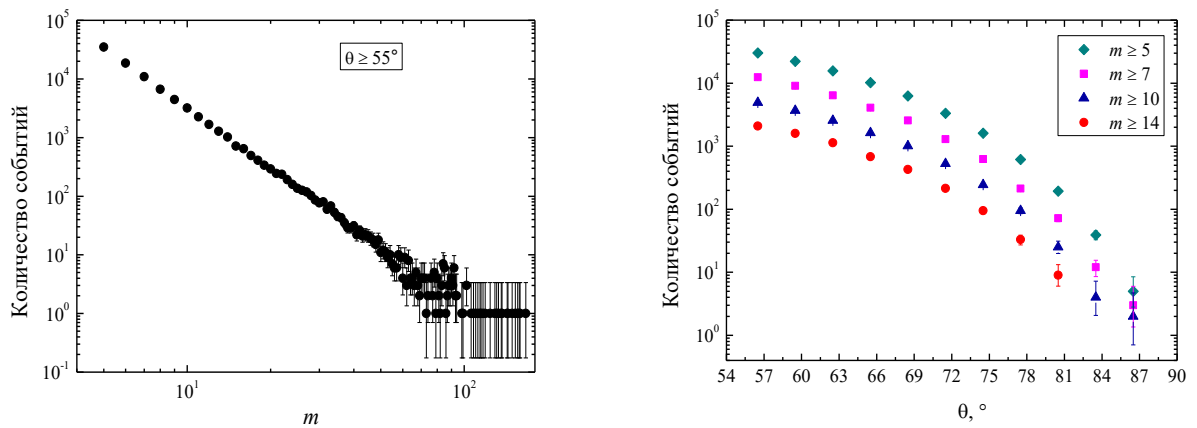


Рис. 10. Слева: дифференциальное распределение событий по количеству мюонов в группах. Справа: распределение количества событий по зенитному углу прихода группы мюонов.

В третьей главе представлено описание особенностей измерения и оценки энергосодержания групп мюонов, локальной плотности мюонов, перехода к удельным энергосодержаниям. Описано моделирование прохождения групп мюонов через супермодули координатного детектора ДЕКОР. Приведены полученные зависимости средних и медиан удельных энергосодержаний. Представлены результаты проверки стабильности работы ЧВК НЕВОД.

В качестве меры энергосодержания групп мюонов использовался измеренный суммарный отклик ЧВК Σ (выраженный в числе фотоэлектронов, ф.э.) всех сработавших ФЭУ детектора НЕВОД.

Локальная плотность мюонов в каждом событии D оценивалась по измеренной множественности мюонов m с учетом эффективной площади супермодулей ДЕКОР $S_{\text{дет}}$ для заданного направления прихода группы. Однако простой расчет плотности как $D = m / S_{\text{дет}}$ приведет к смещению, особенно существенному для умеренных множественностей, оценок плотности из-за падающего спектра плотности частиц, который приближенно описывается формулой:

$$dF / dD = AD^{-(\beta+1)}, \quad (3)$$

где $\beta \approx 2.1$ – показатель наклона интегрального СЛПМ в рассматриваемом диапазоне плотностей и зенитных углов [2]. При условии, что при фиксированной плотности мюонов число частиц, попадающих в детектор, подчиняется распределению Пуассона со средним значением $\langle m \rangle = S_{\text{дет}} D$, среднее значение плотности в событиях может быть найдено по формуле [2]:

$$\langle D \rangle = (m - \beta) / S_{\text{дет}} . \quad (4)$$

Проведено моделирование прохождения групп мюонов через супермодули детектора ДЕКОР с помощью метода Монте-Карло, в котором учитывались два значимых эффекта: условия триггирования супермодуля и неэффективность регистрации. Разработанная программа моделирования является специализированной и предназначена для получения поправок, вносимых в оценку локальной плотности мюонов.

На основе отношения локальной плотности, полученной из результатов моделирования, к локальной плотности, полученной из результатов аналитического расчета, была получена поправка к оценке локальной плотности D . На рис. 11 представлена полученная зависимость отношения от множественности мюонов.

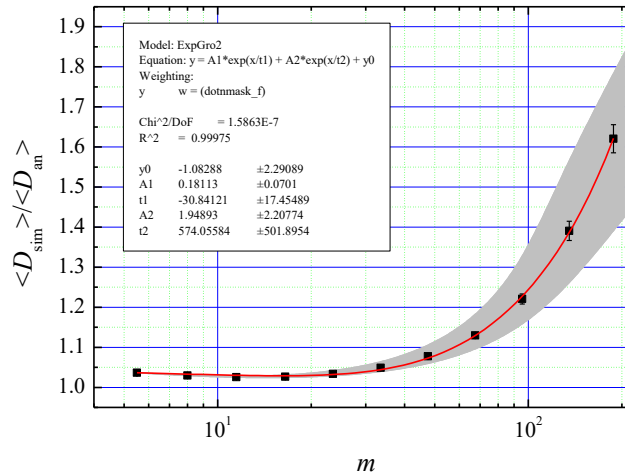


Рис. 11. Зависимость отношения локальной плотности мюонов из результатов моделирования, к плотности, полученной из аналитического расчета, от множественности мюонов.

В эту поправку входит эффект маскировки треков (наложение одного или несколько треков в обеих проекциях), условие триггирования СМ (для триггирования СМ достаточно, чтобы хотя бы один или любая комбинация прошедших через СМ мюонов обеспечили выполнение условия срабатывания любых двух четных и двух нечетных плоскостей в Y-проекции), а также неэффективность регистрации, связанная с попаданием мюона в отключенную полукамеру, а также в зазоры между камерами, зазоры между полукамерами, стенки трубок и холдеры. Как видно из рис. 11, полученная поправка хорошо аппроксимируется в виде суммы двух экспоненциальных функций. Для малых множественностей наиболее существенны условие триггирования СМ и неэффективность регистрации, а для больших множественностей заметное влияние оказывает маскировка треков. Серая полоса представляет неопределенность в величине поправки. Особенно заметная неопределенность наблюдается при множественностях более 70.

В первом приближении суммарное энергосвечение пропорционально плотности мюонов (сплошная линия на рис. 12), поэтому целесообразно рассматривать удельное энергосвечение Σ / D – число фотоэлектронов, деленное на оценку плотности мюонов в событии, полученную по данным координатно-трекового детектора.

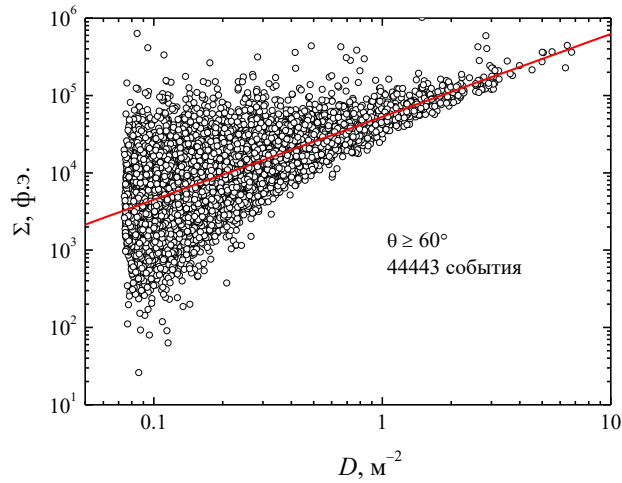


Рис. 12. Корреляции измеренного суммарного энергосвечения с локальной плотностью мюонов.

На рис. 13 представлена зависимость среднего удельного энергосвечения от зенитного угла. Для зенитных углов, соответствующих диапазону от 40° до 55° (красные квадраты на рисунке) заметно сильное уменьшение измеренного удельного энергосвечения с ростом зенитного угла. Это связано с поглощением в атмосфере остаточного вклада электромагнитной и адронной компонент ливней в отклик детектора. Поэтому в дальнейшем для анализа энергосвечений используются события с группами мюонов с зенитными углами $\theta \geq 55^\circ$, где в основном остаются чистые мюоны. Для зенитных углов $\theta \geq 55^\circ$ можно видеть рост средних значений удельного энергосвечения с увеличением зенитного угла, что связано с увеличением средних энергий мюонов в группах.

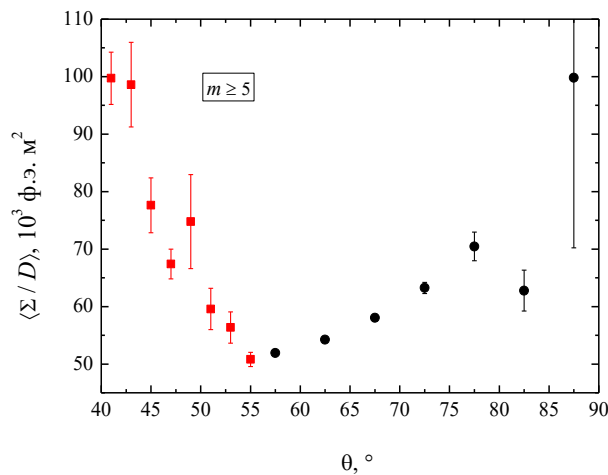


Рис. 13. Зенитно-угловая зависимость среднего удельного энергосвечения.

На рис. 14 приведены зависимости среднего удельного энергосвыделения от локальной плотности мюонов для двух интервалов зенитных углов $\theta = 55^\circ - 65^\circ$ (а), $\theta = 65^\circ - 75^\circ$ (б). Результаты измерений указывают на возрастание среднего удельного энергосвыделения с увеличением локальной плотности мюонов. Подобные зависимости для фиксированных интервалов зенитных углов позволяют проследить возможное изменение средней энергии мюонов в группах с увеличением энергии ПКЛ.

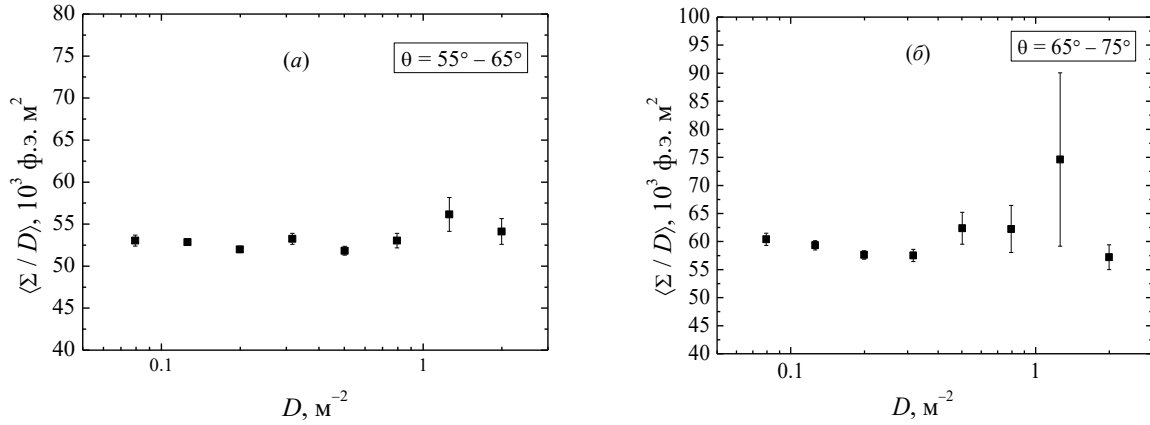


Рис. 14. Зависимости среднего удельного энергосвыделения от локальной плотности мюонов для интервалов зенитных углов $\theta = 55^\circ - 65^\circ$ (а) и $\theta = 65^\circ - 75^\circ$ (б).

На рис. 15 приведено распределение событий по удельному энергосвыделению, полученное для полной статистики групп мюонов с зенитными углами более 55 градусов и числом треков мюонов в ДЕКОР не менее пяти.

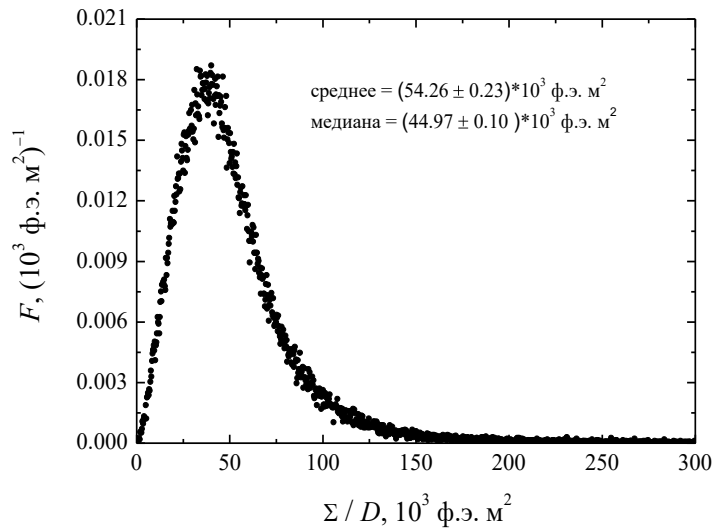


Рис. 15. Распределение событий по удельному энергосвыделению групп мюонов.

Распределение на рис. 15 имеет сильно асимметричный характер с протяженной правой ветвью событий с энергосвыделением, в несколько раз превышающим среднее значение. Помимо искомого физического эффекта (появление дополнительного класса событий с «аномально» высокой энергией мюонов), такие события могут быть связаны с относительно редкими случаями регистрации мюонных групп непосредственно вблизи оси ШАЛ или с катастрофическими потерями энергии отдельных частиц в процессах

тормозного излучения и неупругого взаимодействия мюонов с ядрами. Вследствие асимметрии распределения и существенного отличия его от нормального, наличие (либо отсутствие) в выборках даже единичных событий с экстремально большим энерговыделением может приводить к существенному завышению (соответственно, занижению) выборочных оценок среднего значения и его погрешности.

На рис. 16 приведены распределения событий по логарифму удельного энерговыделения для трех интервалов зенитного угла ($55^\circ \leq \theta < 65^\circ$, $65^\circ \leq \theta < 75^\circ$, $\theta \geq 75^\circ$). В первом приближении эти распределения подобны; их центры смещаются вправо с увеличением зенитного угла. В распределениях видны единичные события с небольшим удельным энерговыделением, а также с экстремально большим энерговыделением, выбивающиеся из распределений.

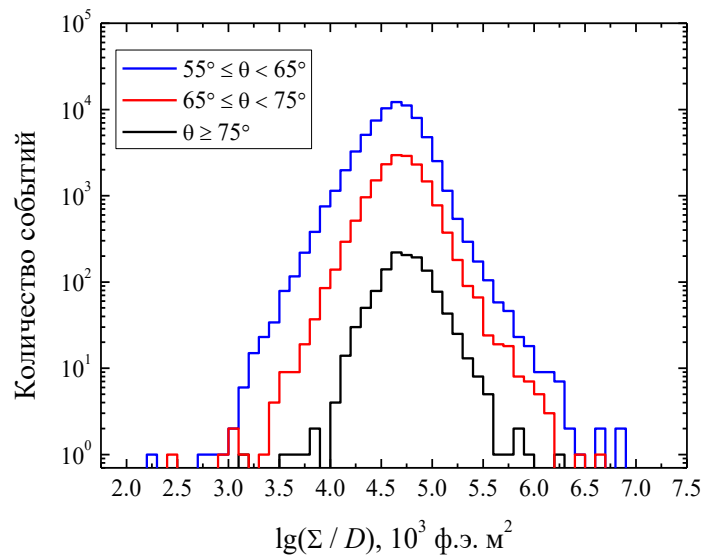


Рис. 16. Распределение событий по логарифму удельного энерговыделения групп мюонов.

Поэтому кроме среднего значения были рассмотрены выборочные оценки медианы (50 % квантиль), которые отличаются большей устойчивостью. Были найдены медианные значения удельного энерговыделения, а в качестве погрешности принималась асимптотическая дисперсия выборочной медианы [29].

В табл. 1 сопоставлены средние значения и медианы удельного энерговыделения групп мюонов для трех интервалов зенитного угла. Как для средних значений, так и для медиан наблюдается заметный рост удельного энерговыделения с увеличением зенитного угла, что подтверждают приведенные на рис. 16 распределения. Из таблицы видно, что статистические погрешности медианы ощутимо меньше, чем для средних значений.

Табл. 1. Средние и медианные значения удельного энерговыделения (в единицах 10^3 ф.э. m^2) для трех интервалов зенитного угла.

Зенитный угол	Среднее	Медиана
$55^\circ \leq \theta < 65^\circ$	52.76 ± 0.25	43.81 ± 0.11
$65^\circ \leq \theta < 75^\circ$	59.43 ± 0.51	48.99 ± 0.25
$\theta \geq 75^\circ$	69.7 ± 2.2	55.2 ± 1.2

Важно отметить, что поведение зависимостей медиан удельного энергосвечения от зенитного угла и плотности мюонов в группах близко к зависимостям для средних значений.

Для проверки стабильности работы черенковского водного калориметра НЕВОД были проанализированы зависимости медиан суммарного отклика на прохождение одиночных околоразностных мюонов и медиан удельного энергосвечения групп мюонов для разных серий измерений от времени. Было выявлено, что отклонение медиан отклика от среднего значения для каждой серии измерений находится в пределах $\sim 2\%$, что является хорошим показателем и демонстрирует достаточно хорошую стабильность работы ЧВК НЕВОД.

В четвертой главе описано моделирование совместного отклика детекторов НЕВОД и ДЕКОР на прохождение групп мюонов. Описана процедура перехода от средних удельных энергосвечений групп к средней энергии мюонов в группах. Оценен остаточный вклад электронно-фотонной и адронной компонент ШАЛ в измеренное энергосвечение групп мюонов. Приведено описание процедуры получения ожидаемых зависимостей средней энергии мюонов в группах.

События с группами мюонов разыгрывались по спектру локальной плотности мюонов с наклоном и угловым распределением, близким к экспериментальному. В моделировании были учтены как физические особенности детектора ДЕКОР, так и условия отбора событий с группами мюонов, близкие к экспериментальным критериям отбора. Число отобранных событий составило 469 тысяч (примерно в 5 раз больше экспериментальной статистики).

Далее для отобранных событий проведено моделирование отклика ЧВК НЕВОД на прохождение групп мюонов с фиксированными энергиями мюонов 100 ГэВ. Для этого была разработана математическая модель на основе пакета программ Geant4 (версия 10.6) [30, 31]. В качестве отклика модели детектора НЕВОД на прохождение частиц служили сигналы ФЭУ в кодах АЦП, пересчитанные (с учетом квантовой эффективности) от числа черенковских фотонов, попавших на фотокатод. Дополнительно рассчитывалось энергосвечение в водном объеме детектора НЕВОД.

Модель ЧВК НЕВОД была проверена и откалибрована по отклику на одиночные околоразностные мюоны. Направления движения одиночных околоразностных мюонов, а также координаты входа в бассейн были взяты из экспериментальных данных. Энергия мюонов при моделировании задавалась близкой к экспериментальным условиям с разбросом по спектру и равнялась в среднем 100 ГэВ. На рис. 17 (слева) представлены зависимости среднего отклика КСМ от расстояния до трека мюона, полученные по экспериментальным данным и результатам моделирования. Как видно из рисунка, экспериментальная зависимость хорошо согласуется с результатами моделирования, их отличие не превосходит 5%, учитывая, что основной вклад (почти 90%) в отклик дают расстояния до 4 м. Сложная форма зависимости определяется в основном отражением черенковского света от поверхности воды в бассейне детектора НЕВОД.

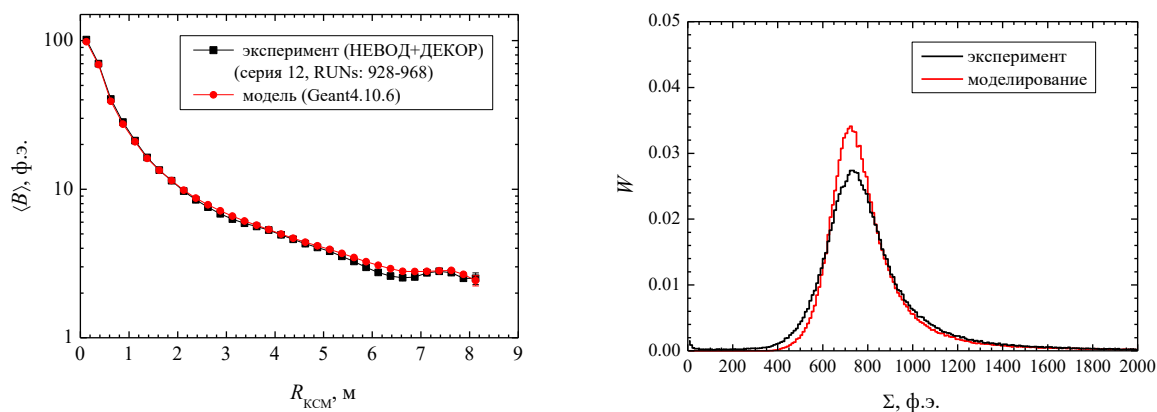


Рис. 17. Зависимости среднего отклика КСМ от расстояния до трека мюона (слева) и распределения событий с одиночными мюонами по суммарному числу фотоэлектронов (справа) для эксперимента и результатов моделирования.

Абсолютная калибровка отклика ЧВК была получена из сопоставления суммарного числа фотоэлектронов всех сработавших ФЭУ в ЧВК (энерговыведения) для эксперимента и результатов моделирования. На рис. 17 (справа) показаны распределения экспериментальных и моделированных событий (нормированные на их полное число) по суммарному числу фотоэлектронов. Был вычислен поправочный множитель к абсолютной калибровке, как отношение среднего значения суммарного числа фотоэлектронов в эксперименте к числу фотоэлектронов из моделирования, который составил 1.0085 ± 0.0056 .

Остаточный вклад от электронно-фотонной и адронной компонент ШАЛ экспоненциально убывает с $\sec\theta$, но остается заметным в перекрывающейся области зенитных углов $55^\circ - 65^\circ$. На рис. 18 показаны зависимости среднего удельного энерговыведения от зенитного угла (черные кружки – измеренное удельное энерговыведение, красные квадраты – ожидаемое удельное энерговыведение от мюонов групп). Ожидаемый мюонный вклад был вычтен из экспериментальной зависимости удельного энерговыведения. По результатам аппроксимации полученных после вычитания точек экспоненциальной функцией от $\sec\theta$ были оценены значения вклада электромагнитной и адронной компонент ШАЛ при интересующих нас зенитных углах 57.5° и 62.5° , который составил $4.62 \pm 1.02 \%$ и $0.73 \pm 0.26 \%$ соответственно.

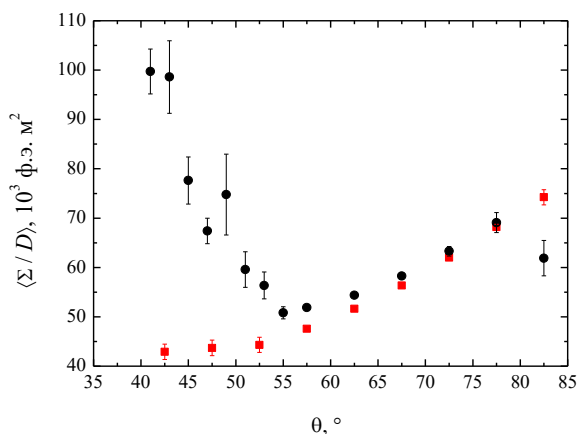


Рис. 18. Зависимости среднего удельного энерговыведения от зенитного угла.

На рис. 19 сопоставлены зависимости измеренного удельного энерговыделения (черные кружки) и моделированного для групп мюонов с фиксированными энергиями мюонов 100 ГэВ (красные квадраты) от зенитного угла после введения всех поправок. Наблюдается увеличение средних значений удельного энерговыделения с ростом зенитного угла (как для эксперимента, так и для результатов моделирования). Важно отметить, что экспериментальные точки расположены ощутимо выше результатов моделирования, что обусловлено тем, что средние значения энергии мюонов в группах больше 100 ГэВ.

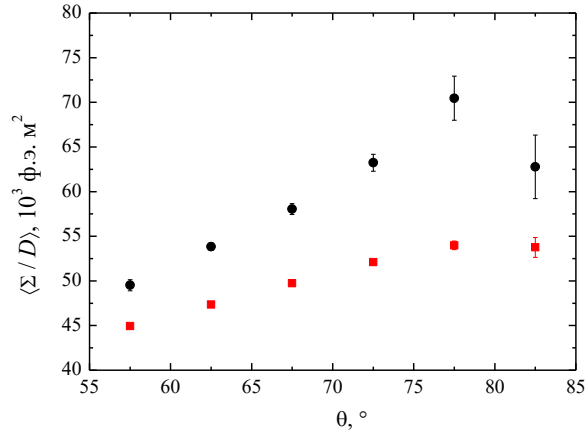


Рис. 19. Зависимость среднего удельного энерговыделения групп мюонов от зенитного угла: эксперимент и результаты моделирования (для фиксированной энергии мюонов 100 ГэВ).

Осуществлен переход от средних удельных энерговыделений к энергии мюонов в группах. Для этого рассчитано отношение R экспериментальных значений средних удельных энерговыделений к моделированным для фиксированных энергий мюонов 100 ГэВ. Используя зависимость средних потерь в воде от энергии мюонов с нормировкой на потери при 100 ГэВ [32] (рис. 20), которая практически линейна в области сотен ГэВ, из отношения измеренного и моделированного удельного энерговыделения вычислялись средние энергии мюонов в черенковском водном калориметре и статистические погрешности.

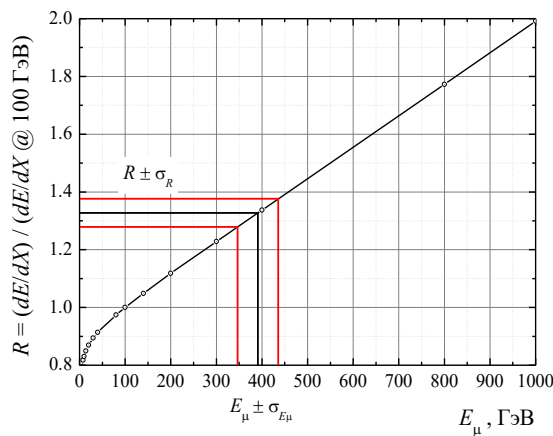


Рис. 20. Средние удельные потери мюонов, нормированные на потери при энергии 100 ГэВ.

На рис. 21а приведена зависимость средней энергии мюонов в группах от зенитного угла. Обозначения на рисунке: стрелки – расчетные среднелогарифмические энергии ПКЛ [2]; сплошная и штриховая кривые – ожидаемые результаты, полученные на основе моделирования ливней в CORSIKA (версия 7.6900) для моделей адронных взаимодействий QGSJET-II-04 и SIBYLL-2.3с [33], соответственно. Верхняя и нижняя пары кривых – для ядер железа и протонов ПКЛ, соответственно. Показатель наклона СЛПМ в расчете ожидаемых зависимостей задавался фиксированным $\beta = 2.2$. Как видно из рисунка 21а, наблюдается увеличение средней энергии мюонов в группах с ростом зенитного угла и хорошее согласие данных с ожидаемой зависимостью.

На рис. 21б представлена зависимость средней энергии мюонов в группах от мюонной плотности для интервала зенитных углов $65^\circ - 75^\circ$. Обозначения кривых и стрелок такие же, как на рис. 21а. Ожидаемые зависимости энергии мюонов рассчитаны на основе результатов моделирования ШАЛ для протонов и ядер железа ПКЛ для фиксированного зенитного угла $\theta = 69^\circ$. Заметно увеличение измеренной средней энергии мюонов при больших плотностях (энергии ПКЛ $> 10^{17}$ эВ); расчетные кривые для ожидаемой средней энергии мюонов демонстрируют тенденцию к плавному уменьшению.

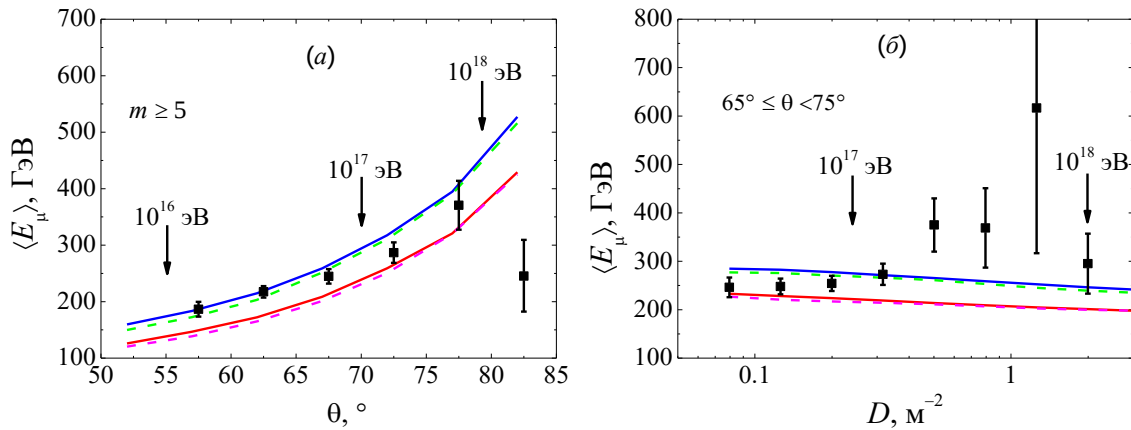


Рис. 21. Зависимость средних значений энергии мюонов в группах мюонов от зенитного угла (а) и мюонной плотности (б) в интервале зенитных углов $65^\circ \leq \theta < 75^\circ$.

В табл. 2 приведены средние значения и погрешности экспериментально определенной энергии мюонов в группах из зависимости, представленной на рис. 21б. Рассмотрены значения наиболее интересных последних четырех точек зависимости. В столбцах для этих точек приведены статистические и систематические погрешности, а также суммарная погрешность, рассчитанная, как корень из суммы квадратов статистической и систематической погрешности. Систематическая погрешность связана с неопределенностью в поправке к локальной плотности мюонов (серая полоса на рис. 11). Для последней точки зависимости значение систематической неопределенности соизмеримо со статистической погрешностью, для других точек систематическая погрешность значительно меньше.

Табл. 2. Значения средней энергии мюонов и погрешностей для последних четырех точек зависимости на рис. 20б.

D , м ⁻²	Число событий	$\langle E_{\mu}^{\text{эксп}} \rangle$, ГэВ	Стат. погрешность, ГэВ	Систем. погрешность, ГэВ	Суммарная погрешность, ГэВ
0.50	505	375	55	5	55
0.79	203	369	81	10	82
1.26	77	617	299	26	300
2.00	30	295	46	41	62

Для определения величины превышения данных над ожидаемыми результатами по значениям четырех последних точек из зависимости на рис. 21б рассчитано отношение экспериментальных значений средней энергии мюонов к ожидаемым для первичных протонов и ядер железа для двух моделей адронных взаимодействий QGSJET-II-04 и SIBYLL-2.3c:

$$K = \frac{\langle E_{\mu}^{\text{эксп}} \rangle}{\langle E_{\mu}^{\text{ож}} \rangle}. \quad (5)$$

Затем найдено среднее значение отношения $\langle K \rangle$ по объединенным значениям рассматриваемых четырех точек зависимости с учетом весов для разных вариантов расчета.

В табл. 3 приведены полученные средние значения и погрешности отношения экспериментально определенной энергии мюонов к ожидаемой для двух моделей адронных взаимодействий и двух предположений о составе ПКЛ. Превышение экспериментальных оценок средней энергии мюонов в группах над расчетными значениями может свидетельствовать о включении нового механизма генерации высокоэнергичных мюонов при сверхвысоких энергиях ПКЛ.

Табл. 3. Средние значения и погрешности отношения экспериментально определенной энергии мюонов в группах к ожидаемой для двух моделей адронных взаимодействий и двух предположений о составе ПКЛ.

$\langle K \rangle$	QGSJET-II-04		SIBYLL-2.3c	
	р	Fe	р	Fe
	1.68 ± 0.18	1.36 ± 0.14	1.70 ± 0.18	1.39 ± 0.14

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Обработаны и проанализированы экспериментальные данные по группам мюонов более чем за 7 лет наблюдений (90 тыс. событий, 53 тыс. ч живого времени). Получены распределения событий с группами мюонов по зенитному и азимутальному углам и множественности мюонов.
2. Проведено моделирование прохождения групп мюонов через детектор ДЕКОР с помощью метода Монте-Карло, в котором учитывались два значимых эффекта: условия триггирования супермодуля и неэффективность регистрации. На основе результатов моделирования получены поправки к оценкам локальной плотности мюонов.

3. Проведена проверка долговременной стабильности работы детектора ДЕКОР и ЧВК НЕВОД при регистрации мюонных групп. Стабильность регистрации групп мюонов по данным детектора ДЕКОР в разных сериях измерений после введения поправок на влияние атмосферных эффектов находится в пределах 1%. Отклонения медиан отклика НЕВОД на одиночные околоризонтальные мюоны и группы мюонов от среднего значения для каждой серии измерений находятся в пределах ~2%.
4. Получены зависимости удельного энергосодержания от зенитного и азимутального углов и локальной плотности мюонов (средние значения и медианы). Наблюдается рост удельного энергосодержания с увеличением зенитного угла. Найдено, что для фиксированных интервалов зенитного угла оценки удельного энергосодержания растут в области больших локальных плотностей.
5. На основе сопоставления измеренных удельных энергосодержаний с результатами моделирования отклика НЕВОД для фиксированных энергий мюонов осуществлен переход к средней энергии мюонов в группах и впервые получены зависимости средней энергии мюонов от зенитного угла и локальной плотности в области, соответствующей энергиям первичных частиц 10 – 1000 ПэВ.
6. Впервые, в интервале зенитных углов $65^\circ - 75^\circ$ для локальных плотностей более 0.4 мюонов/ м^2 , соответствующих энергиям первичных частиц выше 10^{17} эВ, обнаружено увеличение средней энергии мюонов в группах по сравнению с результатами расчета с использованием post-LHC моделей адронных взаимодействий QGSJET-II-04 и SIBYLL-2.3c. Отношения данных к результатам расчета в этой области находятся в пределах от 1.36 ± 0.14 для первичных ядер железа до 1.70 ± 0.18 для первичных протонов.
7. Превышение экспериментальных оценок средней энергии мюонов в группах над расчетными значениями может свидетельствовать о включении нового механизма генерации высокоэнергичных мюонов при сверхвысоких энергиях ПКЛ.

Таким образом, в диссертационной работе решена научная задача, имеющая важное значение для исследования “мюонной загадки” – одной из актуальных проблем в физике космических лучей высоких энергий: получены первые в мире данные о средних энергиях мюонов в группах в наклонных ШАЛ и обнаружено увеличение средней энергии мюонов в группах для больших локальных плотностей, соответствующих энергии первичных космических лучей более 10^{17} эВ.

Результаты диссертации опубликованы в следующих основных работах:

- A1. Юрина Е.А. и др. Статус эксперимента НЕВОД-ДЕКОР по исследованию энергосодержания групп мюонов. Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 4. С. 594. DOI: 10.31857/S0367676521040402 (**BAK**); Yurina E.A. et al. Status of the NEVOD-DECOR experiment on the study of muon bundles energy deposit. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. P. 455. DOI: 10.3103/S1062873821040390 (**Scopus**).
- A2. Yurina E.A. et al. NEVOD–DECOR experiment on the measurement of the energy deposit of cosmic ray muon bundles. Phys. At. Nucl. 2020. V. 83. P. 1369. DOI: 10.1134/S1063778820090306 (**Web of Science, Scopus**).

- A3. Kokoulin R.P., ..., Yurina E.A. et al. Measuring the Cherenkov light yield from cosmic ray muon bundles in the water detector. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2020. V. 952. P. 161586. DOI: 10.1016/j.nima.2018.11.045 (**Web of Science, Scopus**).
- A4. Yurina E.A. et al. Investigation of the energy loss of muon bundles in the Cherenkov water calorimeter. Phys. At. Nucl. 2019. V. 82. P. 680. DOI: 10.1134/S1063778819660505 (**Web of Science, Scopus**).
- A5. Kokoulin R.P., ..., Yurina E.A. et al. Energy loss measurements of inclined muon bundles in the Cherenkov water detector. EPJ Web Conf. 2019. V. 208. P. 08006. DOI: 10.1051/epjconf/201920808006 (**Web of Science**).
- A6. Юрина Е.А. и др. Зависимость энерговыделения мюонных групп от локальной плотности мюонов и зенитного угла. Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. №8. С. 1034. DOI: 10.1134/S0367676519080398 (**БАК**); Yurina E.A. et al. Dependence of the energy deposit of muon bundles on local muon density and zenith angle. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. P. 937. DOI: 10.3103/S1062873819080392 (**Scopus**).
- A7. Yurina E.A. et al. Variations in the intensity of cosmic ray muon bundles according to DECOR data 2012-2017. J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1189. P. 012010. DOI: 10.1088/1742-6596/1189/1/012010 (**Scopus**).
- A8. Кокоулин Р.П., ..., Юрина Е.А. и др. Эксперимент НЕВОД-ДЕКОР по исследованию энерговыделения групп мюонов в наклонных ШАЛ. ЭЧАЯ. 2018. Т. 49. № 1. С. 176 (**БАК**); Kokoulin R.P., ..., Yurina E.A. et al. Measuring the energy deposited by muon bundles of inclined EAS in the NEVOD–DECOR experiment. Phys. Part. Nucl. 2018. V. 49. P. 101. DOI:10.1134/S1063779618010239 (**Web of Science, Scopus**).
- A9. Kokoulin R.P., ..., Yurina E.A. et al. Measurements of the energy deposit of multi-muon events in the Cherenkov water calorimeter. EPJ Web Conf. 2017. V. 145. P. 16002. DOI:10.1051/epjconf/201614516002 (**Web of Science, Scopus**).
- A10. Богданов А.Г., ..., Юрина Е.А. и др. Энерговыделение групп мюонов в наклонных ШАЛ с энергиями 10^{16} – 10^{18} эВ. Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 4. С. 520. DOI:10.7868/S0367676517040093 (**БАК**); Bogdanov A.G., ..., Yurina E.A. et al. Energy deposits of muon bundles in inclined EASes with energies of 10^{16} – 10^{18} eV. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. P. 484. DOI:10.3103/S1062873817040098 (**Scopus**).
- A11. Bogdanov A.G., ..., Yurina E.A. et al. Energy characteristics of multi-muon events in a wide range of zenith angles. J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 798. P. 012049. DOI: 10.1088/1742-6596/798/1/012049 (**Web of Science, Scopus**).
- A12. Kokoulin R.P., ..., Yurina E.A. et al. Energy deposit of muon bundles detected at various zenith angles in the Cherenkov water calorimeter. PoS (ICRC2017). 2017. V. 301. P. 310. DOI:10.22323/1.301.0310 (**Scopus**).

Список цитируемой литературы

1. Petrukhin A.A. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2014. V. 742. P. 228.
2. Bogdanov A.G. et al. Phys. At. Nucl. 2010. V. 73. P. 1852.
3. Bogdanov A.G. et al. Astropart. Phys. 2018. V. 98. P. 13.
4. Bogdanov A.G. et al. J. Phys. Conf. Ser. 2020. V. 1690. P. 012007.
5. Rodriguez G. (Pierre Auger Collab.). EPJ Web of Conferences. 2013. V. 53. P. 07003.
6. Aab A. et al. (Pierre Auger Collab.). Phys. Rev. D. 2015. V. 91. P. 032003.
7. Aab A. et al. (Pierre Auger Collab.). Phys. Rev. Lett. 2016. V. 117. P. 192001.

8. Петрухин А.А. УФН. 2015. Т. 185. № 5. С. 521.
9. Киндин В.В. и др. ПТЭ. 2018. № 5. С. 23.
10. Барбашина Н.С. и др. ПТЭ. 2000. № 6. С. 20.
11. Avati V. et al. Astropart. Phys. 2003. V. 19. P. 513.
12. Abdallah J. et al. (DELPHI Collab.). Astropart. Phys. 2007. V. 28. P. 273.
13. Heck D. et al. Report FZKA 6019. Karlsruhe: Forschungszentrum. 1998. 90 p.
14. Pierog T. et al. Phys. Rev. C. 2015. V. 92. P. 034906.
15. Kalmykov N.N., Ostapchenko S.S. and Pavlov A.I. Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 1997. V. 52B. P. 17.
16. Ostapchenko S. Phys. Rev. D. 2011. V. 83. P. 014018.
17. Ostapchenko S. Phys. Rev. D. 2014. V. 89. P. 074009.
18. Riehn F. et al. PoS (ICRC2015). 2016. V. 236. P. 558.
19. Engel R. et al. EPJ Web Conf. 2017. V. 145. P. 08001.
20. Dembinski H.P. et al. EPJ Web Conf. 2019. V. 210. P. 02004.
21. Dembinski H.P. Phys. At. Nucl. 2019. V. 82. P. 644.
22. Fomin Yu. A. et al. Astropart. Phys. 2017. V. 92. P. 1.
23. Apel W.D. et al. (KASCADE-Grande Collab.). Astropart. Phys. 2017. V. 95. P. 25.
24. Muller S. (Pierre Auger Collab.). EPJ Web Conf. 2019. V. 210. P. 02013.
25. Bellido J.A. et al. Phys. Rev. D. 2018. V. 98. P. 023014.
26. Abbasi R.U. et al. (Telescope Array Collab.). Phys. Rev. D. 2018. V. 98. P. 022002.
27. Gonzalez J. G. (IceCube Collab.). EPJ Web Conf. 2019. V. 208. P. 03003.
28. Glushkov A.V. and Saburov A. Phys. At. Nucl. 2019. V. 82. P. 669.
29. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука. 1978. 832 с.
30. Agostinelli S. et al. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2003. V. 506. P. 250.
31. Allison J. et al. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2016. V. 835. P. 186.
32. Groom D.E. et al. At. Data Nucl. Data Tables. 2001. V. 78. P. 183.
33. Riehn F. et al. PoS (ICRC2017). 2018. P. 301.