

На правах рукописи

Богданов Алексей Георгиевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА МЮОНОВ КОСМИЧЕСКИХ
ЛУЧЕЙ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ МЕТОДОМ КРАТНЫХ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПО ДАННЫМ БПСТ**

01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Автор:

Москва – 2009

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете “МИФИ”

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор
Петрухин Анатолий Афанасьевич,
НИЯУ МИФИ, г. Москва

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
Мухамедшин Рауф Адгамович,
ИЯИ РАН, г. Москва

доктор физико-математических наук
Свешникова Любовь Георгиевна,
НИИЯФ МГУ, г. Москва

Ведущая организация:

Физический институт им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук (ФИАН), г. Москва

Защита состоится “16” декабря 2009 г. в 16.30 на заседании
диссертационного совета Д 212.130.07 НИЯУ МИФИ по адресу:
115409, Москва, Каширское ш., 31, тел.: 324-84-98, 323-95-26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан “ ” ноября 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, профессор _____ С.Е. Улин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Мюоны играют важную роль в физике космических лучей. Поток мюонов формируется в результате распадов заряженных мезонов (большой частью пионов и каонов), образующихся при взаимодействии частиц первичных космических лучей с ядрами атомов воздуха и последующем развитии ядерно-электромагнитных каскадов (широких атмосферных ливней – ШАЛ). Исследования энергетических, пространственных и угловых характеристик мюонной компоненты дают уникальную информацию о спектре и массовом составе первичного космического излучения, а также о характеристиках адронных взаимодействий при высоких энергиях. Интерес к мюонам высоких энергий обусловлен и быстрым прогрессом нейтринной астрономии, поскольку для интерпретации данных крупномасштабных подводных (подледных) детекторов, регистрирующих космические нейтрино, необходимо надежное знание фоновых потоков атмосферных мюонов и нейтрино.

Традиционно изучение высокоэнергичной мюонной компоненты космических лучей проводится в двух основных типах экспериментов – это измерение инклюзивного энергетического спектра одиночных мюонов и регистрация мюонов в составе ШАЛ.

Изучение характеристик мюонной компоненты ШАЛ до сих пор было связано в первую очередь с пространственными распределениями частиц, а энергетический спектр мюонов в составе ШАЛ при энергиях выше 1 ТэВ вообще не исследовался.

Инклюзивный спектр одиночных мюонов в настоящее время практически не изучен в области энергий выше 100 ТэВ, а при энергиях $E_{\mu} \geq 10$ ТэВ изучен слабо, данные подчас противоречат друг другу, а в некоторых экспериментах обнаружен избыток мюонов по сравнению с ожидаемым потоком при обычном механизме их генерации в результате распадов π -, K -мезонов в атмосфере. Наблюдаемое уположение спектра мюонов может быть вызвано как физическими, так и методическими причинами.

Для исследования энергетического спектра мюонов в области порядка 10 ТэВ и более использовались, в основном, следующие методы: магнитный спектрометр, калориметрический и кривая поглощения. Метод магнитного спектрометра (измерение импульса мюона по отклонению его траектории в магнитном поле) не позволил продвинуться по энергиям выше 10 ТэВ как из-за технических

(необходимость увеличения напряженности магнитного поля при одновременном многократном увеличении его объема из-за круто падающего спектра), так и физических (рост вероятности электромагнитного сопровождения с увеличением энергии мюона) причин. Метод кривой поглощения (измерение интенсивности потока мюонов на различных глубинах под землей или под водой) имеет верхний предел достижимых энергий ~ 100 ТэВ (учитывая флуктуации потерь), когда поток атмосферных мюонов становится сравним с фоновым потоком малоэнергичных мюонов, образующихся в результате взаимодействий нейтрино в окружающем веществе. Возможности исследования энергетического спектра мюонов в области ~ 100 ТэВ и выше калориметрическим методом (регистрация больших каскадов с энергией $\varepsilon \sim E_\mu$) ограничиваются малой вероятностью рождения тормозного γ -кванта с энергией, сравнимой с энергией мюона, и, следовательно, необходимостью соответствующего увеличения масштабов (массы) установки. Поэтому наиболее перспективным для исследования энергетического спектра мюонов космических лучей при энергиях ≥ 100 ТэВ представляется использование метода парметра (измерение числа и энергий каскадов с $\varepsilon \ll E_\mu$), который практически не имеет ограничений сверху на измеряемые энергии мюонов.

Работа основана на экспериментальном материале установок БПСТ и “Андырчи” и выполнена в рамках соглашения о научно-техническом сотрудничестве между БНО ИЯИ РАН, ИЯИ РАН и МИФИ.

Цели диссертационной работы

Развитие метода кратных взаимодействий, основанного на идеях метода парметра, для исследования спектра мюонов в области выше 10 ТэВ с помощью установок малой толщины. Поиск мюонов сверхвысоких энергий (≥ 100 ТэВ) по данным Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа (БПСТ) и совместным данным БПСТ и ливневой установки “Андырчи”.

Новизна полученных результатов

В ходе данной работы развит предельный случай метода парметра – метод двукратных взаимодействий, который позволяет использовать тонкие установки. Данный метод впервые использован для исследования поведения “инклюзивного” энергетического спектра

мюонов в области десятков-сотен ТэВ на установке БПСТ, а также для изучения энергетических характеристик мюонной компоненты ШАЛ на комплексе БПСТ-“Андырчи”. Впервые показано, что энергетический спектр мюонов не имеет каких-либо особенностей до энергий $\approx 50-70$ ТэВ, если учитывать дополнительный поток мюонов быстрой генерации, а в области энергий выше 100 ТэВ лучше всего согласуется с расчетами, предполагающими множественное образование мюонов сверхвысоких энергий (VHE) в новых физических процессах в области излома энергетического спектра космических лучей, хотя не исключается и больший (на уровне $R \approx 3 \times 10^{-3}$ при энергии ~ 100 ТэВ) вклад чармированных частиц, чем предсказывается существующими теоретическими оценками ($R \approx 10^{-3}$).

Практическая значимость работы

Развитый в работе метод кратных взаимодействий можно использовать для исследования мюонов сверхвысоких энергий при анализе данных других экспериментов в области физики космических лучей. Полученные научные результаты будут полезны при планировании новых экспериментов в области космических лучей сверхвысоких энергий. С помощью разработанного комплекса программ для моделирования процесса прохождения мюонной компоненты ШАЛ через телескоп может быть расширен круг задач, решаемых на комплексе установок БПСТ-“Андырчи”. Новые версии программных пакетов GEANT4 и CORSIKA со скорректированными алгоритмами моделирования мюонных взаимодействий широко используются научным сообществом для решения разного рода физических задач.

Личный вклад автора

Личный вклад автора состоит в развитии метода кратных взаимодействий и в получении физических результатов. Автор лично разработал комплекс программ расчета отклика БПСТ на одиночные мюоны и группы мюонов в составе ШАЛ на основе пакетов моделирования GEANT4 и CORSIKA, а также алгоритмы и программное обеспечение для обработки и визуального представления экспериментальных данных и моделированных событий. Автор непосредственно участвовал в отборе, обработке и последующем физическом анализе экспериментальных и моделированных событий в рамках данного метода. В процессе работы автор внес существенный

вклад в дальнейшее развитие программ GEANT4 и CORSIKA посредством тестирования заложенных в них алгоритмов моделирования процессов взаимодействия мюонов и их корректировки. В течение нескольких лет автор принимал участие в экспедициях сотрудников экспериментального комплекса НЕВОД МИФИ на Баксанскую нейтринную обсерваторию ИЯИ РАН, проводившихся с целью восстановления системы амплитудного анализа БПСТ. Основная часть публикаций по теме диссертации подготовлена и написана автором.

Автор защищает

1. Метод двукратных взаимодействий – предельный случай метода парметра для изучения энергетического спектра мюонов, результаты его исследования (феноменологические параметры, чувствительность к форме спектра мюонов космических лучей) и возможность использования для анализа данных БПСТ с целью поиска мюонов сверхвысоких энергий.
2. Результаты внесенных изменений и проверки корректности моделирования процессов электромагнитных взаимодействий мюонов в программах GEANT4 и CORSIKA.
3. Комплекс программ для расчета отклика БПСТ на прохождение мюонной компоненты космических лучей, а также для обработки экспериментальных и моделированных событий.
4. Результаты исследования энергетического спектра мюонов высоких и сверхвысоких энергий в рамках метода кратных взаимодействий: отсутствие серьезных отличий от обычного спектра мюонов до энергий $\approx 50-70$ ТэВ и изменение поведения спектра при энергиях ≥ 100 ТэВ.
5. Результаты анализа совместных экспериментальных данных установок БПСТ и “Андырчи” по регистрации высокоэнергичных мюонов, коррелированных с ШАЛ.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на 3-й Всероссийской конференции “Физика элементарных частиц и атомного ядра” (Москва, 2002), 28-й Международной конференции по космическим лучам (Япония, 2003), на 28-й (Москва, 2004) и 30-й (Санкт-Петербург, 2008) Всероссийских конференциях по космическим лучам, 21-м Европейском симпозиуме по космическим

лучам (Словакия, 2008), опубликованы в их трудах, а также в шести статьях в журналах “Известия РАН. Серия физическая”, ЭЧАЯ, “Ядерная физика” и “IEEE Transactions on Nuclear Science”.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации: 108 страниц, 48 рисунков, 17 таблиц, 80 наименований цитируемой литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обсуждаются достоинства и недостатки методов оценки энергий мюонов, составляющих десятки ТэВ, представлен краткий аналитический обзор экспериментов и результатов исследования спектра мюонов в области энергий более 10 ТэВ; рассмотрены гипотезы, которые чаще всего привлекаются для объяснения избыточного потока мюонов при таких энергиях: распады чармированных частиц, вклад которых принято характеризовать отношением R числа мюонов к числу заряженных пионов на уровне генерации, и мюоны сверхвысоких энергий (VHE), которые должны появляться, если образование излома в спектре ШАЛ связано с изменением характера адронных взаимодействий.

В **первой главе** дано описание комплекса установок БПСТ-“Андырчи” и приведены основные сведения об используемых экспериментальных данных.

БПСТ (рис.1) находится в тоннеле, проложенном под горой Андырчи (Северный Кавказ), на эффективной глубине 850 м в. э., что соответствует пороговой энергии детектируемых мюонов около 220 ТэВ. Телескоп представляет собой четырехэтажное здание высотой 11 м и основанием (17×17) м², перекрытия и стены которого покрыты более чем 3 тыс. сцинтилляционных детекторов размерами $(70 \times 70 \times 30)$ см³ каждый, образующими 8 плоскостей – 4 вертикальных и 4 горизонтальных (две из которых внутренние). Объем отдельного детектора просматривается фотоумножителем типа ФЭУ-49. Энерговыведение в детекторе измеряется с помощью логарифмического преобразователя амплитуды импульса в длительность в диапазоне от 0.5 до 600 ТэВ. Относительная погрешность измерений составляет около 10%.

В данной работе анализируются экспериментальные данные, полученные за два периода работы БПСТ: 1983-1995 гг. и 2003-2004 гг. (после восстановления амплитудного анализа). Рассматривались только интервалы времени с надежной работой всех систем, отвечающих за измерение энерговыделений в детекторах, при этом “живое” время регистрации составило $\approx 3.3 \times 10^8$ с. Предварительно отбирались события с суммарным энерговыделением в горизонтальных плоскостях телескопа ≥ 10 ГэВ, их общее количество ≈ 2 млн.

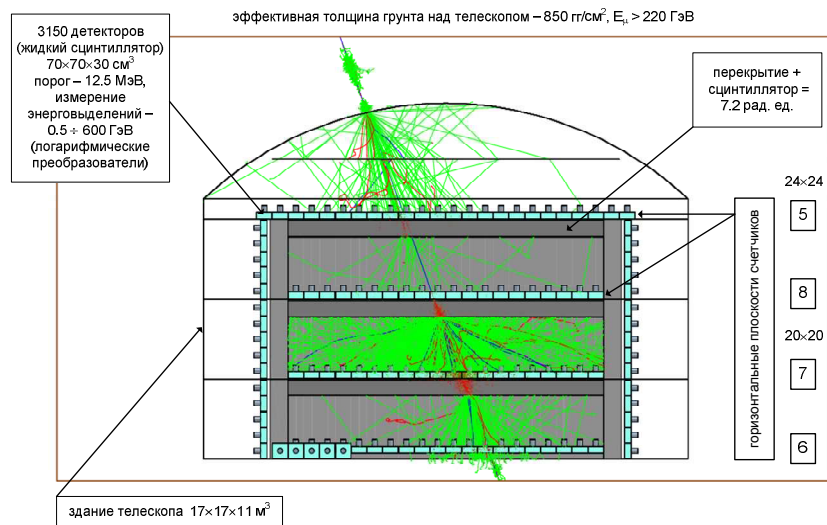


Рис.1. Прохождение высокоэнергичного мюона через БПСТ.

Ливневая установка “Андырчи” расположена на высоте 2060 м над уровнем моря и состоит из 37 детекторов площадью 1 м² каждый на основе пластмассовых сцинтилляторов. Расстояние между детекторами в проекции на горизонтальную плоскость ≈ 40 м, общая площадь установки $\approx 4.5 \times 10^4$ м². Мощность ливня определяется с точностью не хуже 12% для ШАЛ с числом частиц N_e в диапазоне: $5.7 \leq \lg(N_e) \leq 7.2$, если число сработавших детекторов в установке – 24 и более. Излом дифференциального спектра ШАЛ по числу частиц находится в области $\lg(N_e) \approx 6.3$ для околоразвертикальных событий. Расстояние по вертикали между БПСТ и центральным детектором ливневой установки – 350 м; телесный угол, под которым она видна из телескопа, ≈ 0.35 ср. Установки “Андырчи” и БПСТ включены в схему совпадений, частота которых составляет ≈ 0.1 с⁻¹.

В данной работе используются данные эксперимента БПСТ-“Андырчи” за период с сентября 2002 г. по июль 2003 г. Отбирались события, когда на установке “Андырчи” сработал ливневой триггер (не

менее 4-х детекторов n_{det}), и при этом во временном интервале 26 мкс в подземном телескопе сработал хотя бы один логарифмический преобразователь ($n_{\text{log}} \geq 1$).

Анализ экспериментальных данных показал, что события с восстановленными параметрами ШАЛ, регистрируемые одновременно установками “Андырчи” и БПСТ, являются в достаточной мере совместными и пригодны для последующей обработки и сопоставления с результатами моделирования. Отбор событий по временному интервалу между моментами регистрации наземной и подземной частью комплекса БПСТ-“Андырчи” (7.5-9 мкс), а также углу между направлениями ШАЛ, определенными по данным двух установок ($\leq 10^\circ$), обеспечивает надежную режекцию фоновых событий.

За период с сентября 2002 г. по июль 2003 г. (“живое” время экспозиции ≈ 115 суток) совместно установками БПСТ и “Андырчи” было зарегистрировано 1970 событий, 124 из которых принадлежат области выше излома спектра ШАЛ по числу частиц.

Вторая глава посвящена моделированию отклика БПСТ на прохождение мюонов методом Монте-Карло с помощью программы GEANT4 и моделированию мюонной компоненты ШАЛ по программе CORSIKA, представлены результаты тестирования алгоритмов расчета мюонных взаимодействий, реализованных в этих программах.

Перед проведением полномасштабных расчетов была выполнена проверка корректности учета процессов электромагнитных взаимодействий мюонов, заложенных в GEANT4, в широком диапазоне энергий (100 ГэВ – 100 ПэВ) и для разных материалов (C, Fe, Sn, HI, CaCO₃ и др.). С этой целью был разработан специальный тест – TestEm17 (включенный в официальный релиз пакета GEANT4), который позволяет проверять как правильность описания формы распределений переданных при розыгрыше энергий, так и абсолютную величину полного сечения. При тестировании были выявлены и исправлены программные ошибки, допущенные при первоначальной реализации алгоритмов моделирования практически всех основных процессов: неупругого взаимодействия мюонов, образования пар и тормозного излучения. На рис.2 приведен пример, иллюстрирующий ситуацию до и после внесения исправлений. Хорошо видно, что распределения числа взаимодействий по относительным переданным энергиям изначально были сильно искажены, а после внесения исправлений практически совпадают с теоретическими (отношение близко к 1). В результате корректировки теоретические зависимости

сечений процессов и распределений по переданным во взаимодействиях энергиям воспроизводятся при моделировании (версия 9.1.p01) на уровне не хуже единиц процентов.

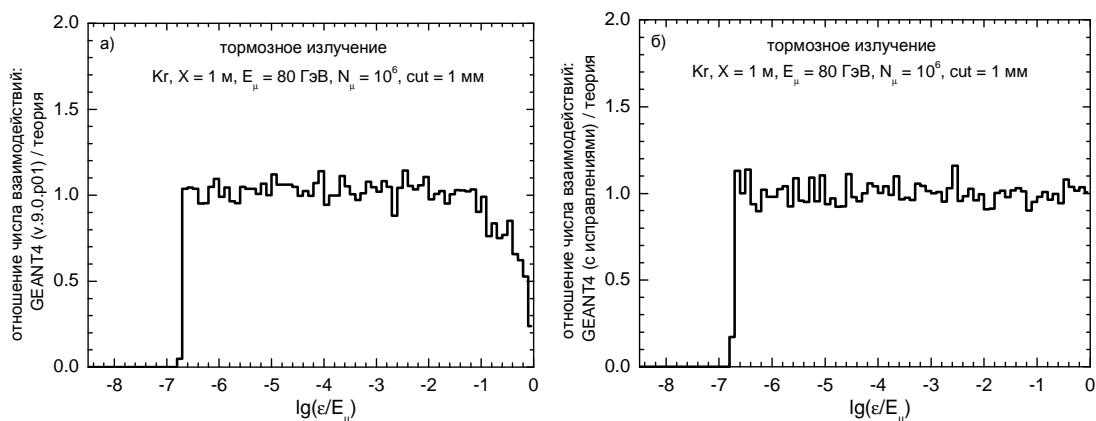


Рис.2. Отношение распределений числа взаимодействий по относительным передачам энергии, рассчитанных по программе GEANT4, к теоретическим.

Чтобы проверить верность реализации мюонных взаимодействий в программе CORSIKA, было проведено сопоставление результатов расчетов средних потерь энергии мюонов в атмосфере на ее основе с теорией. По результатам тестирования ревизии в той или иной степени подверглись все основные процессы, приводящие к потерям энергии мюонов. В итоге, обеспечена устойчивость средних потерь к изменениям порога (cut), ниже которого вторичные частицы в программе не прослеживаются (рис.3а). Устранены “осцилляции” сечений и средних потерь для дискретных процессов. Предложена и внедрена удобная параметризация эффекта плотности для ионизационных потерь, который ранее не учитывался в программе CORSIKA (рис.3б), введена зависимость средних потерь энергии от высоты. Исправлена ошибка в сечении процесса тормозного излучения, используемом для розыгрыша передач. Существенно (в десятки раз) ускорена обработка актов образования пар, что позволило добиться общего ускорения моделирования мюонной компоненты (особенно для наклонных ливней). После внесения исправлений сечения процессов взаимодействия мюонов (рождение пар, неупругое взаимодействие, тормозное излучение, ионизационные потери) воспроизводятся на уровне не хуже нескольких процентов (версия 6.735).

Для моделирования отклика БПСТ на прохождение одиночных мюонов с помощью GEANT4 был разработан пакет программ Bust1mu, а на прохождение мюонной компоненты ШАЛ – BustEAS. При описании геометрии телескопа и составляющих материалов

представлены все основные элементы детектора. Учитывались все физические процессы, реализованные в GEANT4.

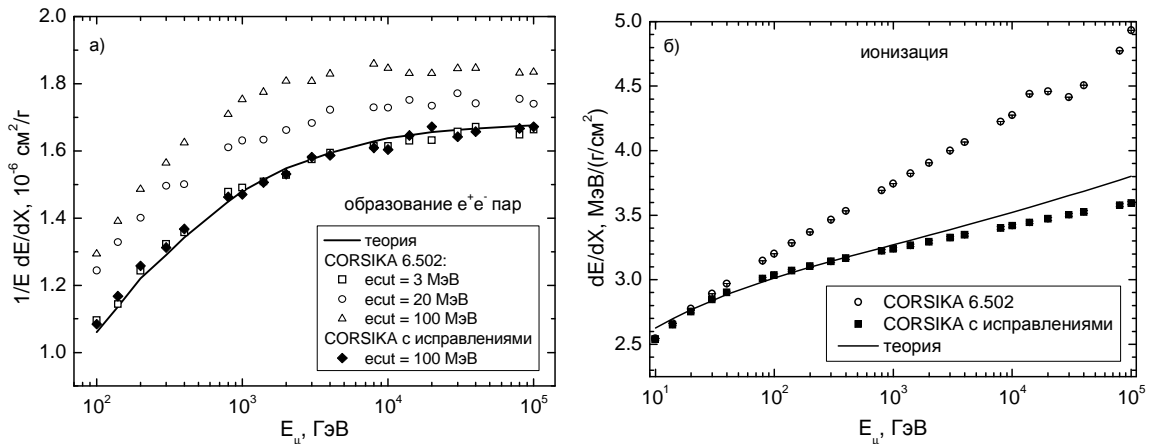


Рис.3. Средние потери энергии мюонов в воздухе (теоретические и рассчитанные по программе CORSIKA).

В среднем доля энергии, теряемая каскадом в сцинтилляционных плоскостях телескопа, составляет около 10%, поэтому суммарное энерговыделение в телескопе ≥ 10 ГэВ может дать мюон с энергией не менее 100 ГэВ (что соответствует ≈ 350 ГэВ на поверхности), если всю свою энергию он израсходует на образование каскада. Статистика расчетов для мюонов с энергией выше 350 ГэВ сравнима с ожидаемым числом таких мюонов за период наблюдений (при обычном спектре), для мюонов с энергией ≥ 1 ТэВ превышает ожидаемое число в 5 раз, ≥ 10 ТэВ – в 40 раз, ≥ 100 ТэВ – в 500 раз. Средние потери мюонов в слое грунта над установкой рассчитывались аналитически с учетом профиля окружающих гор, а отклик БПСТ полностью моделировался по GEANT4, начиная с 3 м грунта над телескопом. Требовалось, чтобы трек мюона пересекал все четыре горизонтальные плоскости телескопа. В каждом событии сохранялась информация об энерговыделении в сцинтилляционных детекторах, а также о типе, координатах взаимодействия и величине переданной энергии, если она была более 1 ГэВ.

При построении анализируемых далее в работе распределений для различных спектров мюонов статистика моделированных событий с разными порогами по энергии, а также наклон спектра, угловая зависимость, эффективная площадь регистрации и т. п. учитывались введением соответствующих весов.

Расчет высокоэнергичной мюонной компоненты ШАЛ выполнялся по программе CORSIKA с моделями адронных взаимодействий: QGSJET01C и SIBYLL-2.1. Разыгрывались ливни от

первичных протонов и ядер железа с зенитными углами $\theta \leq 70^\circ$ и энергиями E_0 выше 3×10^{15} эВ (10^{15} эВ – для Fe) и показателем дифференциального спектра – 3.1 (2.7 – для Fe). Дополнительно моделировались ШАЛ для набора фиксированных энергий первичных частиц, зенитных и азимутальных углов.

В третьей главе излагается метод кратных взаимодействий, обсуждаются его феноменологические характеристики и чувствительность метода к форме спектра мюонов, а также эффективность критериев отбора событий; рассмотрено влияние переходного эффекта в реальной структуре установки на форму электронно-фотонного каскада.

При достаточно высоких энергиях мюона в широкой области значений относительных передач энергий $\epsilon/E_\mu \sim 10^{-1}-10^{-3}$ доминирует процесс образования электронно-позитронных пар (отсюда и название метода – парметр), сечение которого быстро растет с энергией E_μ . Коэффициент пересчета от энергий зарегистрированных каскадов к эффективной энергии мюонов составляет ~ 100 . При достаточной толщине установки (≥ 500 рад. ед.) и большом количестве регистрирующих слоев (≥ 100) этот метод позволяет оценивать энергию отдельных мюонов. При небольшом числе слоев и малой толщине установки метод парметра переходит в метод кратных взаимодействий, в предельном случае – двукратных. В этом случае измерение энергий отдельных мюонов невозможно, но энергетические характеристики потока мюонов могут быть исследованы на статистической основе. Чувствительность данного метода зависит от вида энергетического спектра мюонов и, как показывают оценки, для более пологого спектра, чем обычный спектр мюонов, например $\sim E_\mu^{1.7}$ (prompt, VHE мюоны, мюоны ШАЛ в области $E_\mu \ll E_0$), достаточно регистрировать лишь два взаимодействия даже в установке толщиной порядка нескольких десятков рад. ед.

Таким образом, значительный объем накопленных на БПСТ экспериментальных данных (более чем 10-летняя длительность измерений в сочетании с аксептансом телескопа около $200 \text{ м}^2 \text{ ср}$) позволяет делать заключения о поведении спектра мюонов в области сверхвысоких энергий методом кратных взаимодействий (посредством сопоставления наблюдаемых распределений характеристик событий с ожидаемыми), несмотря на небольшое число слоев (четыре) подземного телескопа и его малую толщину (≈ 30 рад. ед.).

Действительно, структура БПСТ позволяет выделять не более двух отчетливо разделяемых “взаимодействий” мюона в телескопе

(рис.4). При этом в продольном профиле энерговыделений (по горизонтальным плоскостям) каждого события должен наблюдаться минимум (“провал”) в одной из внутренних плоскостей (E_{\min}) и два максимума (“горба”) – сверху и снизу от него (E_1 – энерговыделение в первом по величине максимуме, E_2 – во втором), глубина “провала” характеризуется соотношением $K_2 = E_2/E_{\min}$.

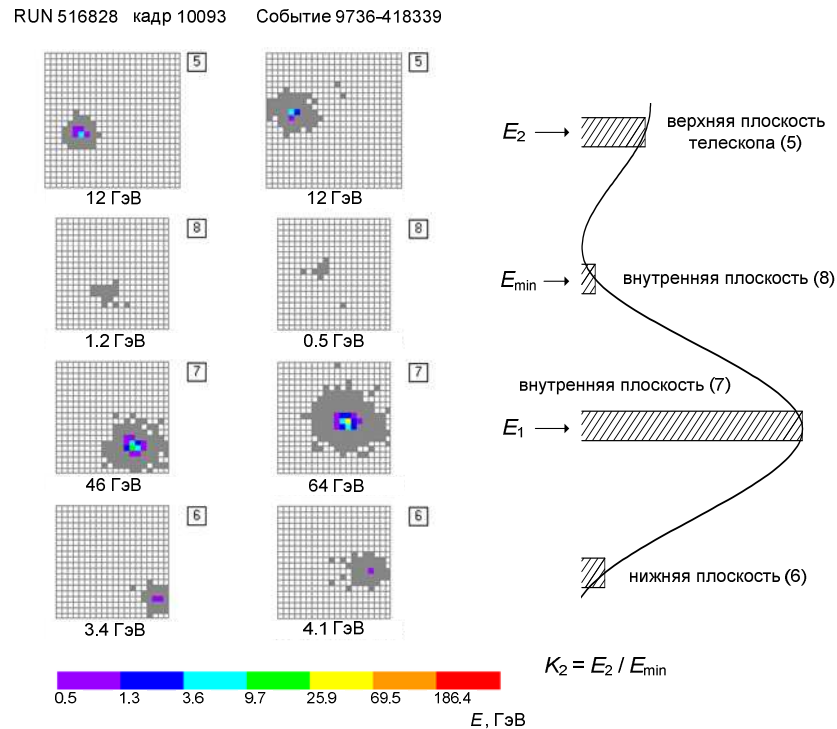


Рис.4. Кратные взаимодействия мюонов в БПСТ. Слева: примеры экспериментального и моделированного событий. Справа: продольный профиль энерговыделений и феноменологические параметры.

Качественно параметры E_1 , E_2 , K_2 влияют на отбор событий следующим образом: 1) сдвиг по E_2 практически пропорционален сдвигу по энергии мюонов; 2) увеличение минимального значения K_2 позволяет подавить вклад ядерных каскадов, которые могут имитировать кратные взаимодействия; 3) повышение порога по E_1 дает возможность на порядок снизить вклад мюонов с энергиями несколько ТэВ, сохранив при этом значительную часть статистики для высокоэнергичных частиц (~ 100 ТэВ).

Одним из наиболее удобных и эффективных вариантов использования метода параметра является модификация, основанная на использовании порядковых статистик энергий, переданных во взаимодействиях ϵ_j , которые располагаются в порядке убывания и для оценки E_μ используется n -е значение ϵ_n . Энерговыделения, которые

измеряются в сцинтилляционных плоскостях БПСТ и определяют продольный профиль события, неоднозначно связаны с энергиями, переданными во взаимодействиях мюона. Это обусловлено флуктуациями положения точек взаимодействия относительно плоскостей детекторов, наложением каскадов от разных взаимодействий и т.п. Однако анализ информации о взаимодействиях, полученной при моделировании, показал, что энерговыделение во втором максимуме профиля E_2 определяется в основном вторым по величине каскадом, связанным с процессом образования e^-e^+ пар мюоном (относительные передачи энергии $\epsilon/E_\mu \sim 10^{-2}-10^{-3}$), а первый по величине каскад с большой вероятностью вызывается тормозным излучением или неупругим (фотоядерным) взаимодействием мюона ($\epsilon/E_\mu \geq 0.1$). Так как спектры порядковых статистик приблизительно подобны спектру мюонов, для дальнейшего анализа целесообразно воспользоваться распределениями по E_2 , варьируя при этом другие параметры отбора событий: $E_1 (\geq 5 \text{ ГэВ}, 20 \text{ ГэВ}, \dots)$ и $K_2 (\geq 1, 2, 5, \dots)$. Заметим, что $E_1 \geq E_2$ по определению, поэтому далее условие отбора, записанное, например, в виде: $E_1 \geq 20 \text{ ГэВ}$, означает, что $E_1 \geq 20 \text{ ГэВ}$ для значений E_2 менее 20 ГэВ и $E_1 \geq E_2$ при $E_2 \geq 20 \text{ ГэВ}$.

Чтобы исследовать чувствительность метода кратных взаимодействий к форме спектра мюонов для БПСТ на большой статистике, использовалась “быстрая” одномерная программа моделирования отклика детектора PAIR METER. Схема расчета заключалась в следующем: сначала разыгрываются взаимодействия мюона в веществе установки и в слое над ней, затем “пришиваются” электромагнитные каскадные кривые и в результате вычисляются энерговыделения в плоскостях телескопа. Нормировка и параметры аппроксимации каскадной кривой, в том числе учитывающие зависимость переходного эффекта перекрытие-сцинтиллятор от зенитного угла, были получены на основе моделирования электромагнитных каскадов для реальной структуры телескопа с помощью GEANT4.

Для различных условий отбора и “пробных” спектров мюонов, отличающихся в основном интегральным показателем наклона: $\gamma_\mu = 2.5, 2.7, 2.9$ при $R = 0$ и $\gamma_\mu = 2.7$ при $R = 3 \times 10^{-3}$ (нормировка спектров осуществлялась на полную интенсивность мюонов, достигающих уровня наблюдения), были построены распределения моделированных событий с кратными взаимодействиями по E_2 . Анализ отношений распределений по E_2 для перечисленных спектров к одному и тому же распределению для спектра с показателем $\gamma_\mu = 2.7$ при $R = 0$ показывает, что при больших значениях E_2 ($\sim 100 \text{ ГэВ}$ и выше)

чувствительность метода к форме спектра мюонов возрастает – происходит изменение наклона распределений. В наибольшей степени это проявляется для спектра с дополнительным потоком мюонов – в данном случае от распадов чармированных частиц (prompt), т.е. $\gamma_\mu = 2.7$ при $R = 3 \times 10^{-3}$.

Необходимо отметить, что дальнейшее количественное сопоставление с экспериментальными данными основывалось на результатах 3D моделирования отклика БПСТ на прохождение мюонов с помощью GEANT4, полученных (в отличие от упрощенных расчетов по программе PAIR METER) с учетом всех особенностей установки и известных физических процессов.

В **четвертой главе** рассматриваются особенности обработки экспериментальных данных, два варианта критериев отбора событий в рамках метода кратных взаимодействий, и обсуждаются результаты сопоставления экспериментальных данных по регистрации “одиночных” мюонов с расчетами для разных спектров мюонов, а также результаты восстановления спектра мюонов космических лучей.

При прохождении через БПСТ одиночного мюона (в том числе для моделированных событий) энергосыделения в горизонтальных плоскостях соответствуют энергосыделениям от каскадов, вызванных взаимодействиями мюона в перекрытиях телескопа. В случае, когда через установку проходит группа мюонов, энергосыделение в плоскости телескопа складывается из энергосыделения от интересующего нас каскада и энергосыделений от каскадов, образованных другими мюонами группы, что приводит к необходимости усложнения алгоритма обработки экспериментальных событий, который выглядит следующим образом. На горизонтальных плоскостях телескопа ищутся компактные “пятна” сработавших детекторов – области, где детекторы касаются друг друга хотя бы углами. Энергосыделение в компактном пятне определяется как сумма энергосыделений в принадлежащих ему детекторах. Если на всех четырех плоскостях существуют пятна, принадлежащие одной и той же траектории мюона, то анализируется профиль энергосыделений вдоль нее, и, при условии, что он имеет характерную для кратных взаимодействий форму, вычисляются значения параметров E_1 , E_2 , E_{\min} .

Отбор экспериментальных событий проводился в два этапа – программный отбор и визуальный анализ событий-кандидатов, чтобы исключить события, связанные с ошибочной реконструкцией (например, присчет “ложных” треков), корректно обработать “краевые” события и т.д. Суммарное число экспериментальных

событий после отбора по критериям $E_1, E_2 \geq 5$ ГэВ, $K_2 \geq 1$ составило 1831, а статистика моделированных событий – 27.5 тыс. событий.

Экспериментальные распределения событий по величине E_2 (дифференциальные и интегральные) сравнивались (рис.5) с результатами моделирования отклика телескопа по GEANT4 на прохождение одиночных мюонов для различных условий отбора событий и следующих вариантов спектра мюонов:

1) обычный спектр мюонов от π -, K -распадов в атмосфере ($R = 0$), рассчитанный по приближенной формуле (Т.К. Gaisser, 1990)

$$\frac{dN_\mu}{dE_\mu} = 0.14 E_\mu^{-2.7} \times \left(\frac{1}{1 + \frac{1.1 E_\mu \cos \theta}{115}} + \frac{0.054}{1 + \frac{1.1 E_\mu \cos \theta}{850}} + R \right) [\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1} \text{ГэВ}^{-1}];$$

- 2) обычный спектр с добавлением prompt мюонов ($R = 1 \times 10^{-3}$);
- 3) то же с параметром $R = 3 \times 10^{-3}$;
- 4) обычный спектр с минимальным потоком VHE_{\min} мюонов.
- 5) то же с максимальным потоком VHE_{\max} мюонов;

Вклад VHE мюонов в суммарный энергетический спектр мюонов описывается формулой (С.Ю. Матвеев и др., 2009):

$$\frac{dN_{VHE\mu}}{dE_\mu} = \frac{4m I_0 \gamma_1 (E_0 / 10^6 \text{ ГэВ})^{-\gamma_1}}{E_0 [1 - (\gamma_1 / \gamma_2) (E_k / E_0)^{(\gamma_2 - \gamma_1) / \gamma_2}]},$$

где E_μ и энергия первичной частицы E_0 связаны соотношением

$$4mE_\mu = E_0 - E_k (E_0 / E_k)^{\gamma_1 / \gamma_2}, \quad E_0 > E_k.$$

Здесь γ_1 и γ_2 – интегральные показатели спектра первичных частиц до и после его излома при энергии E_k ; m – характерная множественность рождающихся VHE мюонов; $I_0 = 1.5 \times 10^{-10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ – интегральная интенсивность первичных частиц с энергией выше 1 ПэВ. Максимальный поток VHE мюонов здесь вычислялся в предположении, что $m = 1$, $E_k = 3 \times 10^{15}$ эВ, $\gamma_1 = 1.7$, $\gamma_2 = 2.1$. При расчете минимального потока задавалась фиксированная множественность $m = 10$, принималось, что $E_k = 5 \times 10^{15}$ эВ, $\gamma_1 = 1.7$, $\gamma_2 = 2.0$.

Из рис.5 следует, что, в целом, в пределах статистических погрешностей, эксперимент и расчет для обычного спектра мюонов достаточно хорошо согласуются в интервале $5 \text{ ГэВ} \leq E_2 \leq 30 \text{ ГэВ}$. Однако при больших значениях E_2 ($> 80 \text{ ГэВ}$) ожидаемое число событий от обычного спектра в несколько раз, а на “хвосте” распределения – почти на порядок меньше наблюдаемого в эксперименте, т.е. как раз в той области значений E_2 ($\sim 100 \text{ ГэВ}$ и выше), где метод кратных взаимодействий в применении к БПСТ

становится наиболее восприимчивым к изменению формы спектра мюонов.

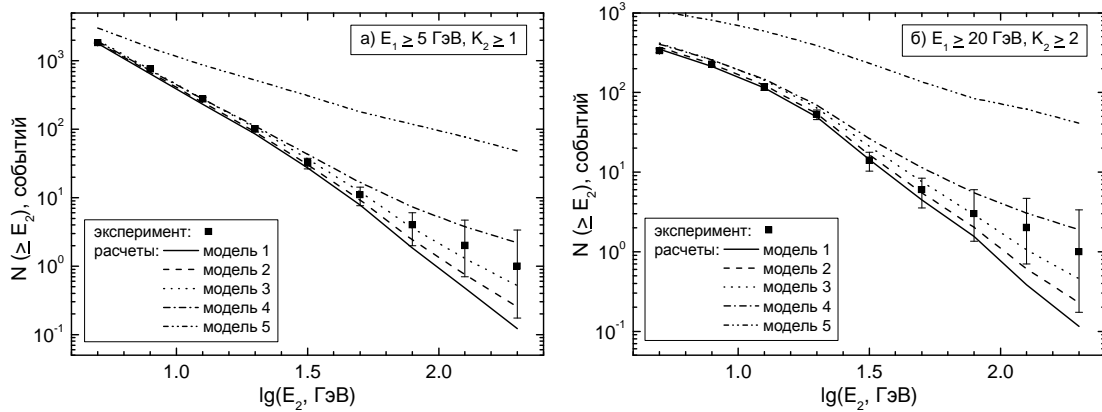


Рис.5. Интегральные распределения экспериментальных и моделированных событий по E_2 для разных моделей спектра мюонов и критериев отбора.

При сравнении измеренного дифференциального распределения по E_2 с ожидаемым в предположении обычного спектра мюонов (от π - и K -распадов) значение χ^2 оказывается равным 32.9 (при 8 степенях свободы), что соответствует вероятности справедливости гипотезы о такой форме спектра менее 0.1%. Ситуация остается примерно такой же и после включения prompt мюонов на ожидаемом уровне $R = 10^{-3}$ ($\chi^2 = 24.7$). Гораздо лучшее согласие наблюдается при сравнении с результатами расчетов для спектров с добавлением достаточно большого количества prompt (при $R = 3 \times 10^{-3}$) или минимального потока VNE_{\min} мюонов: значения χ^2 в этих случаях равны 17.4 и 15.6, соответственно. Как видно из рис.5, экспериментальные данные противоречат существованию максимального дополнительного потока VNE_{\max} мюонов.

Важно отметить, что зарегистрированный избыток событий при больших E_2 проявляется при разных подходах к обработке экспериментальных данных и критериях их отбора (например, рис.5а и 5б). Все эти события зарегистрированы внутри телескопа во всех плоскостях и имеют четкую топологию. Поэтому отклонение экспериментальных распределений от расчетных, полученных в рамках генерации мюонов в распадах π - и K -мезонов, представляется значимым, несмотря на небольшую статистику, и может указывать на возможность существования потока VNE или prompt мюонов с рассматриваемыми параметрами.

Распределения мюонов, дающих вклад в события с заданными пороговыми значениями E_2 , по энергиям довольно широкие даже для обычного спектра мюонов (рис.6а), а при наличии дополнительного потока мюонов с более жестким спектром (prompt или VNE) и

больших E_2 имеют еще и бимодальную форму (рис.6б). Появление второго “горба” в области энергий мюонов порядка сотен ТэВ и выше обусловлено хорошей чувствительностью метода кратных взаимодействий именно к этой более жесткой части спектра мюонов.

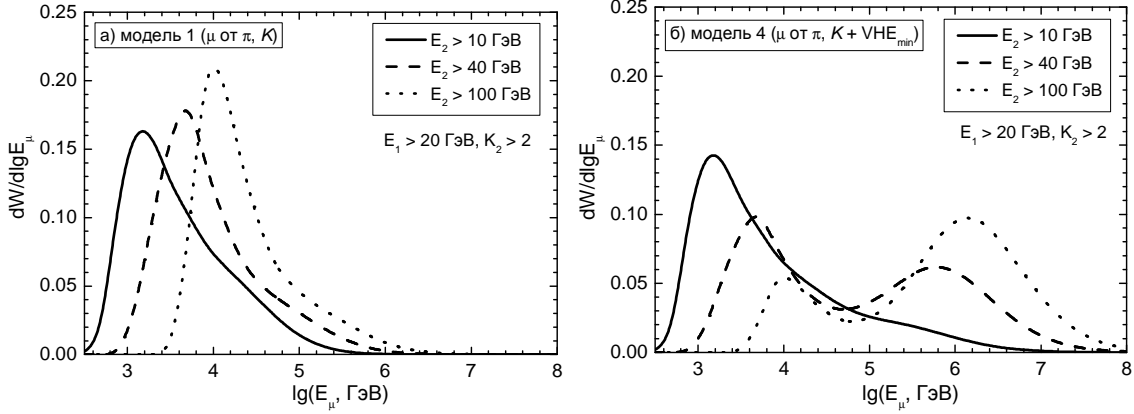


Рис.6. Энергетические распределения мюонов, дающих вклад в события с разными E_2 для двух вариантов спектра мюонов.

Энергетические спектры мюонов по данным БПСТ методом кратных взаимодействий были получены следующим образом. Сначала для заданных критериев отбора строились распределения экспериментальных событий по $\lg(E_2, \text{ТэВ})$: подсчитывалось число событий ($N_{\text{эксп}}$) в каждом бине $\Delta \lg E_2 = 0.7-0.9, 0.9-1.1, \dots, 2.3-2.5$ – для дифференциального распределения и полное число событий с $\lg E_2 \geq 0.7, 0.9, \dots, 2.5$ – для интегрального. Ожидаемое число событий ($N_{\text{мод}}$) в распределениях по $\lg E_2$, а также энергетические распределения мюонов, дающих вклад в события в заданном интервале $\Delta \lg E_2$ или $\geq \lg E_2$, соответствующие им средние, среднелогарифмические и медианные энергии E_{μ}^* – для дифференциальных распределений и эффективные пороговые энергии мюонов $E_{\mu 0}^*$ – для интегральных распределений вычислялись на основе результатов моделирования отклика телескопа с помощью GEANT4 для каждой комбинации критериев отбора (параметры E_1 и K_2) и четырех вариантов спектра мюонов на поверхности. Оценки искомых дифференциальных и интегральных спектров мюонов можно получить в следующем виде:

$$d\tilde{N}_{\mu}(E_{\mu}^*)/dE_{\mu} = dN_{\mu}(E_{\mu}^*)/dE_{\mu} \times N_{\text{эксп}}^{\text{диф}}(E_2)/N_{\text{мод}}^{\text{диф}}(E_2);$$

$$\tilde{N}_{\mu}(\geq E_{\mu 0}^*) = N_{\mu}(\geq E_{\mu 0}^*) \times N_{\text{эксп}}^{\text{инт}}(E_2)/N_{\text{мод}}^{\text{инт}}(E_2),$$

где $dN_{\mu}(E_{\mu}^*)/dE_{\mu}$ и $N_{\mu}(\geq E_{\mu 0}^*)$ ожидаемый спектр мюонов, вычисленный в точках $E_{\mu}^*, \geq E_{\mu 0}^*$.

На рис.7 представлены восстановленные таким образом дифференциальные спектры мюонов для четырех предположений о вертикальном спектре мюонов на поверхности и одной из комбинаций ($E_1 \geq 5$ ТэВ, $K_2 \geq 1$) критериев отбора событий с наибольшей статистической обеспеченностью. Так как в настоящее время нет общепринятого варианта оценки энергий мюонов, которым приписывается “ответственность” за экспериментальные события, то на рис.7 приведены все три: кружки – средняя энергия, ромбы – среднелогарифмическая, треугольники – медианная; кривыми показаны ожидаемые спектры мюонов.

Анализируя рис.7 можно сделать следующие выводы. В предположении, что спектр мюонов формируется только в результате распадов π - и K -мезонов в атмосфере (т.е. обычный, рис.7а), наблюдается сильная зависимость результатов восстановления спектра мюонов от выбора эффективной энергии мюонов (средняя, среднелогарифмическая, медианная) – в виде сильного разброса точек. Более того, полученная для этой модели интенсивность потока мюонов в области энергий несколько десятков ТэВ (считая по медианной или среднелогарифмической энергиям), либо в районе сотни ТэВ (если брать среднюю энергию) практически на порядок больше ожидаемой и серьезно противоречит данным других экспериментов. Разброс экспериментальных точек относительно расчетных кривых уменьшается по мере увеличения вклада дополнительной (жесткой) компоненты спектра в общий поток (рис.7б,в), при этом согласие улучшается и в области умеренных энергий (десятки ТэВ), т.е. исчезает зависимость от выбора эффективной энергии мюонов (средней, среднелогарифмической или медианной энергии) при реконструкции спектра мюонов. Наилучшее согласие данных с расчетами в широкой области энергий от единиц ТэВ до единиц ПэВ наблюдается для спектра мюонов с добавлением потока VNE_{\min} мюонов с указанными выше параметрами (рис.7г) – сумма квадратов отклонений экспериментальных точек от теоретической кривой в этом случае минимальна.

На рис.8а,б приведено сопоставление полученных на основе экспериментальных данных БПСТ методом кратных взаимодействий дифференциальных и интегральных спектров с данными других экспериментов (*E.V. Bugaev et al., 2000*) в области энергий E_{μ} выше 10 ТэВ. При восстановлении спектров использовалась модель 4 – обычный спектр мюонов с добавлением минимального потока VNE_{\min}) В качестве оценки энергий мюонов в данной работе использовались

среднелогарифмические значения, как наиболее оптимальные для степенного спектра.

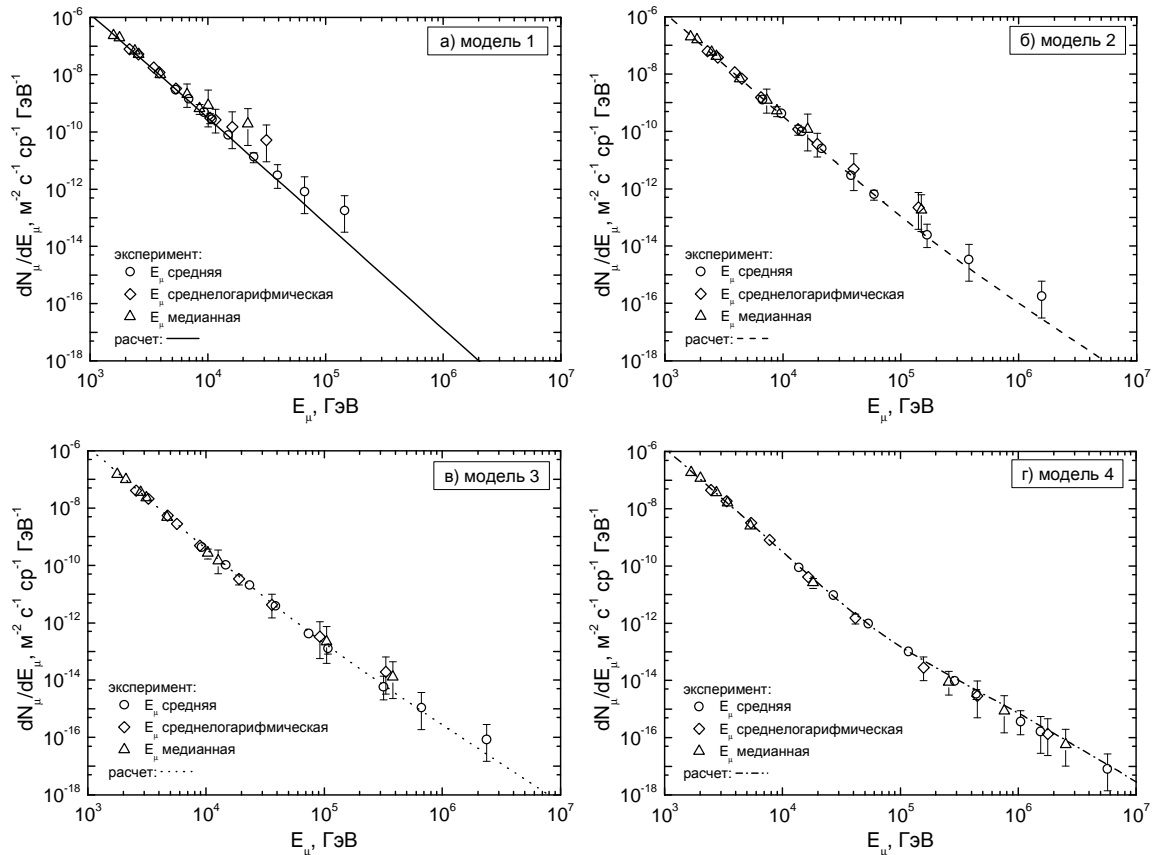


Рис.7. Дифференциальные спектры мюонов по данным БПСТ (метод кратных взаимодействий).

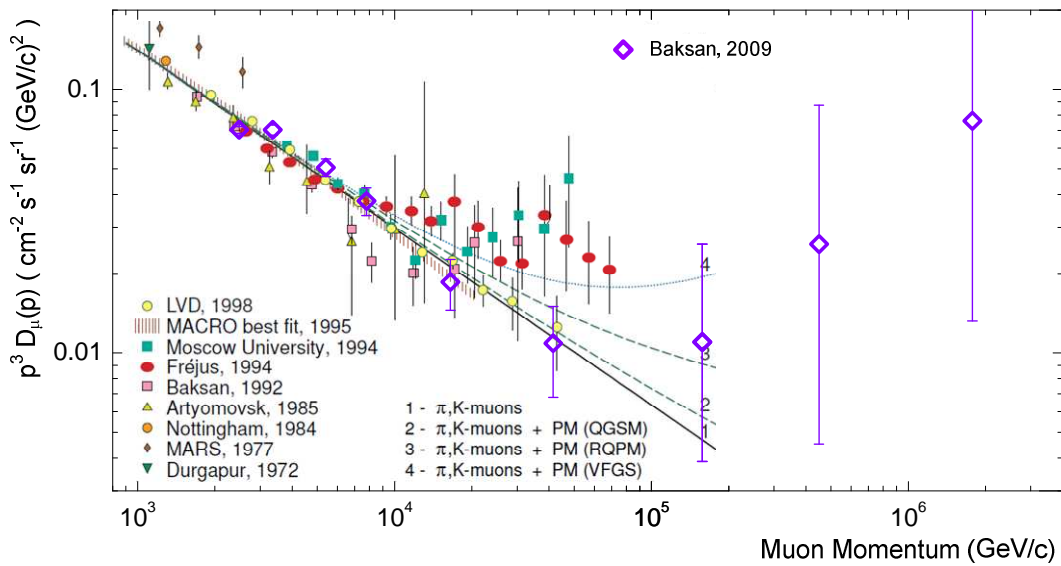


Рис.8а. Дифференциальный спектр мюонов на уровне моря для вертикального направления по данным различных экспериментов (E.V. Vigaev et al., 2000). Добавлены точки БПСТ (ромбы, данная работа).

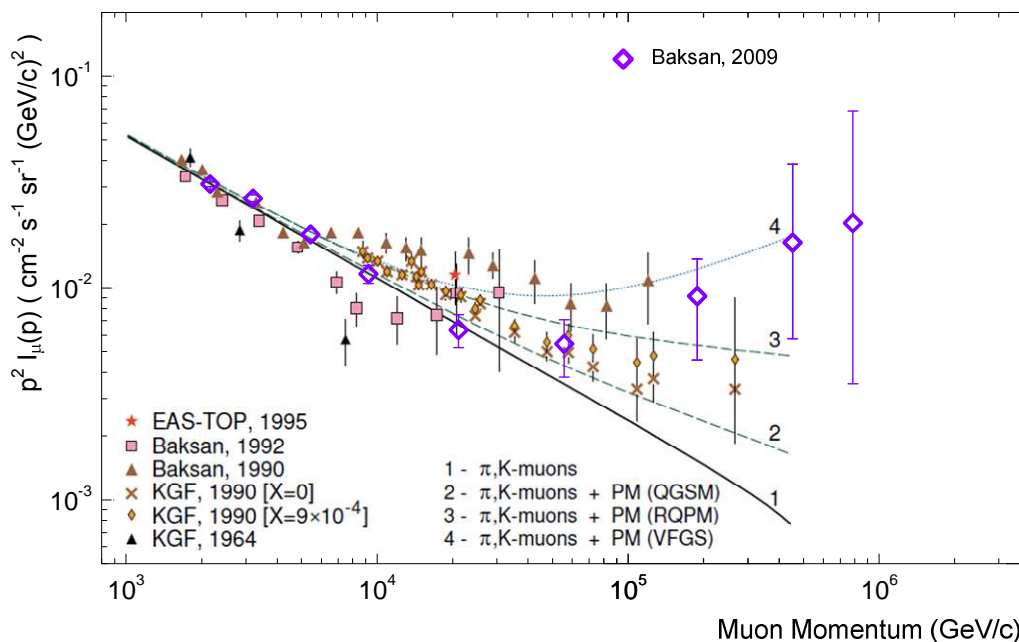


Рис.8б. Интегральный спектр мюонов на уровне моря для вертикального направления по данным различных экспериментов (E.V. Vigaev et al., 2000). Добавлены точки БПСТ (ромбы, данная работа).

Пятая глава посвящена поиску мюонов сверхвысоких энергий в стволах ШАЛ и анализу событий, одновременно регистрируемых установками БПСТ и “Андырчи”.

Необходимо отметить, что в экспериментальных событиях с числом сработавших на горизонтальных плоскостях телескопа детекторов $N_{\text{дет}} \sim 100$ и более, которые ассоциируются с прохождением через установку групп мюонов вблизи оси мощных ШАЛ, выделение и анализ треков отдельных мюонов в рамках метода кратных взаимодействий становится затруднительным. Поэтому для поиска в таких событиях VHE мюонов (благодаря их способности часто взаимодействовать и давать мощные каскады) используется другой подход, основанный на сравнении числа экспериментальных и моделированных событий с большими энерговыделениями.

С помощью программ CORSIKA и GEANT4 был рассчитан отклик телескопа на мюонную компоненту ливней, положение оси которых разыгрывались случайным образом на расстояниях до 15 м от краев телескопа. Статистика моделированных событий по порядку величины совпадает с ожидаемым их количеством за время эксперимента. Доля событий с $N_{\text{дет}} \sim 100$ и осями, попавшими за пределы указанной области, составляет менее 1%. Примерно в половине событий с $N_{\text{дет}} \sim 100$ ось ШАЛ пересекает все

горизонтальные плоскости телескопа. Среднее число сработавших детекторов на горизонтальных плоскостях БПСТ $N_{\text{дет}}$ является хорошим критерием отбора событий с большими группами мюонов в составе ливней. Так, распределения по $N_{\text{дет}}$ для ШАЛ с осью в телескопе и одиночных мюонов достаточно уверенно разделяются уже на уровне $N_{\text{дет}} \geq 70$: в этом диапазоне содержится более 80% событий с ливнями и менее 1% событий с одиночными мюонами.

Для анализа и последующего сопоставления экспериментальные и моделированные события отбирались сначала по условию: $N_{\text{дет}} \geq 70$, либо ≥ 120 , а затем проводился поиск событий с каскадами. Наличие каскада в любой горизонтальной плоскости телескопа определялось по показанию детектора с максимальным энерговыделением E_{max} (это связано с быстрым затуханием энерговыделений в поперечном направлении) – требовалось, чтобы величина E_{max} превышала заданный порог: 20, 45 или 110 ГэВ. Далее вычислялась доля событий с каскадами разной величины от числа событий с $N_{\text{дет}} \geq 70$ (≥ 120). В табл.1 приведено отношение такой доли экспериментальных событий к доле моделированных для обычных ШАЛ, откуда следует, что существует достаточно разумное согласие (в пределах статистических погрешностей) между экспериментом и результатами расчетов (ливни от протонов, модель адронных взаимодействий QGSJET01C).

Табл.1. Отношение доли экспериментальных событий с каскадами к доле моделированных (для обычных ШАЛ).

$N_{\text{дет}}$	$E_{\text{max}}, \text{ГэВ}$		
	≥ 20	≥ 45	≥ 110
≥ 70	1.01 ± 0.08	1.12 ± 0.16	1.08 ± 0.31
≥ 120	1.04 ± 0.13	1.30 ± 0.30	1.32 ± 0.57

Сравнение данных моделирования отклика телескопа на прохождение мюонов в стволах обычных ливней и ШАЛ с “вбрасыванием” дополнительного VHE мюона (вблизи оси) показало, что при максимальном потоке VHE_{max} мюонов доля событий с каскадами должна быть на порядок больше, чем для обычных ШАЛ (это согласуется и с результатами, полученными методом кратных взаимодействий для одиночных мюонов), а при минимальном потоке VHE_{min} мюонов – в 1.5-2 раза. Существующие на сегодняшний день неопределенности в оценках массового состава при энергиях выше излома спектра и в выборе адекватной модели, которые могут влиять

на полученные результаты также с точностью до фактора 1.5-2, не позволяют сделать однозначного вывода относительно существования или отсутствия минимального потока VHE_{\min} мюонов именно в стволах ШАЛ по данным БПСТ (в рамках обсуждаемого в этой части работы подхода – по числу событий с большими энерговыделениями).

Из общего числа экспериментальных событий, зарегистрированных совместно установками БПСТ и “Андырчи”, были отобраны события с восстановленными параметрами ШАЛ. Необходимым условием отбора также было соответствие продольного профиля энерговыделений по горизонтальным плоскостям БПСТ типичному для кратных взаимодействий. Однако из-за небольшой статистики требование, налагаемое на величины параметров E_1 и E_2 было “смягчено” ($E_1, E_2 \geq 0.5$ ГэВ, $K_2 \geq 1$) по сравнению с требованием при отборе “одиночных” мюонов ($E_1, E_2 \geq 5$ ГэВ, $K_2 \geq 1$). Т.е. достаточно было наличия хотя бы одного сработавшего логарифмического преобразователя в каждом из двух максимумов профиля энерговыделений. Дополнительными условиями отбора являлись одновременность и соосность – “квазипараллельность” траектории высокоэнергичного мюона, восстановленной по данным БПСТ, направлению прихода ШАЛ по данным “Андырчи”.

За период совместных наблюдений установками БПСТ и “Андырчи”, который рассматривается в данной работе, зарегистрировано $N_{EAS} = 497$ ливней с числом частиц N_e выше излома спектра и, по крайней мере, одним мюоном в подземном телескопе. Число ШАЛ с осью, попавшей в телескоп, составило $N_{EAS\ axes} = 69$. При этом наблюдалось 9 событий с кратными взаимодействиями (параметры отбора E_1 и $E_2 \geq 0.5$ ГэВ, $K_2 \geq 1$), одно событие с E_1 и $E_2 \geq 5$ ГэВ, $K_2 \geq 1$ и ни одного по условию: E_1 и $E_2 \geq 5$ ГэВ, $K_2 \geq 2.5$, что позволяет получить ограничение на число мюонов сверхвысоких энергий в ШАЛ.

Если предположить, что образуется единственный VHE мюон, то их через телескоп должно пройти столько же, как и осей ШАЛ. Тогда верхний предел на число мюонов с энергией ≥ 100 ТэВ на 90% доверительном уровне можно оценить по формуле:

$$N_{VHE\mu} \leq \frac{2.3}{N_{EAS\ axes} \epsilon_1},$$

где $\epsilon_1 = 0.042$ – эффективность регистрации мюонов с энергией ≥ 100 ТэВ для заданного условия отбора в БПСТ была получена при моделировании отклика телескопа на прохождение одиночных мюонов

с помощью GEANT4. Таким образом, для ливней после излома ограничение на число мюонов сверхвысоких энергий на один ливень составляет ≈ 0.8 , что не противоречит результатам, полученным по одиночным мюонам.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы данной работы.

1. Методические

1.1. Для исследования энергетического спектра мюонов космических лучей развит предельный случай метода параметра – метод двукратных взаимодействий, и обоснована его применимость для поиска мюонов сверхвысоких энергий по данным БПСТ.

1.2. Впервые выполнена полномасштабная проверка корректности моделирования процессов электромагнитных взаимодействий мюонов в пакетах программ GEANT4 и CORSIKA, выявлен и исправлен ряд неточностей, предложены улучшения алгоритмов расчета. Показано, что после внесения соответствующих изменений теоретические зависимости сечений процессов взаимодействия мюонов воспроизводятся при моделировании на уровне не хуже единиц процентов.

1.3. Разработан комплекс программ для полного трехмерного моделирования методом Монте-Карло отклика БПСТ на прохождение мюонной компоненты космических лучей, и проведены массовые расчеты. Создано программное обеспечение для обработки и визуального представления моделированных и экспериментальных событий.

2. Физические

2.1. Впервые в рамках метода кратных взаимодействий выполнены обработка и анализ экспериментальных данных БПСТ за 1983-1995, 2003-2004 гг.; получены распределения экспериментальных событий по энерговыделениям вторых по величине каскадов, образованных мюонами в телескопе.

2.2. Обнаружено превышение числа экспериментальных событий с кратными взаимодействиями (при больших энерговыделениях и для различных условий отбора) над ожидаемым от “обычного” спектра мюонов, образующихся в результате распадов π -, K -мезонов в атмосфере.

2.3. В энергетическом спектре мюонов, восстановленном по данным БПСТ методом кратных взаимодействий, не наблюдается каких-либо серьезных отклонений от обычного спектра мюонов, образующихся при распадах π - и K -мезонов в атмосфере, до энергий ≈ 50 -70 ТэВ, если при анализе учитывать дополнительный поток мюонов быстрой генерации.

2.4. Впервые получены экспериментальные оценки спектра мюонов в области энергий выше 100 ТэВ и показано, что лучше всего они согласуются с расчетами, предполагающими множественное образование VHE мюонов в новых физических процессах в области излома энергетического спектра космических лучей, хотя не исключается и более высокий (на уровне $R \approx 3 \times 10^{-3}$ при энергии ~ 100 ТэВ) вклад чармированных частиц, чем предсказывается существующими теоретическими оценками ($R \approx 10^{-3}$).

2.5. На основе совместного анализа экспериментальных данных установок БПСТ и “Андырчи” за 2002-2003 гг. получено верхнее ограничение на число VHE мюонов в составе ШАЛ от первичных частиц с энергиями выше излома спектра космических лучей.

Список публикаций по теме диссертации

1. В.Б. Петков, А.Г. Богданов и др. Эксперимент по поиску мюонов с энергией > 100 ТэВ в составе ШАЛ на комплексе “Андырчи”–БПСТ. Изв. РАН, Сер. физ., 2004, Т. 68, № 11, С. 1615-1617.
2. В.Н. Бакатанов, А.Г. Богданов и др. Исследование мюонов сверхвысоких энергий по данным Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа. Изв. РАН, Сер. физ., 2005, Т. 69, № 3, С. 394-396.
3. A.G. Bogdanov, A.A. Petrukhin, A.V. Shalabaeva. The role of VHE muons in explanation of unusual events observed in cosmic rays. Physics of Particles and Nuclei (ЭЧАЯ), 2005, V. 36, N 5, P. 658-663.
4. A.G. Bogdanov et al. Geant4 simulation of production and interaction of muons. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006, V. 53, N 2, P. 513-519.
5. А.Г. Богданов и др. Кратные взаимодействия мюонов в БПСТ. Изв. РАН, Сер. физ., 2009, Т. 73, № 5, С. 668-670.
6. А.Г. Богданов и др. Исследование спектра мюонов высоких энергий методом кратных взаимодействий по данным Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа. Ядерная физика, 2009, Т. 72, С. 2112-2120.

7. А.Г. Богданов, А.В. Шалабаева. Отклик детектора БПСТ на мюоны высоких энергий. 3-я Всероссийская конференция “ФЭЧАЯ”, МИФИ, 2002, С. 38-39.
8. V.B. Petkov, V.V. Bakatanov, Yu.F. Novoseltsev, R.V. Novoseltseva, A.S. Lidvansky, A.L. Tsyabuk, A.G. Bogdanov et al. Possibility to search for VHE muons with Baksan underground scintillation telescope. 28 ICRC, 2003, Tsukuba, Japan, V. 3, P. 1207-1210.
9. V.B. Petkov, A.G. Bogdanov et al. A search for very high energy muons ($E_\mu > 100$ TeV) in EAS around the knee. 28 ICRC, 2003, Tsukuba, Japan, V. 1, P. 57-60.
10. A.G. Bogdanov et al. Multiple Interactions of Muons in Baksan Underground Scintillation Telescope. Proceedings of the 21st European Cosmic Ray Symposium, Kosice, Slovakia, 2008. Edited by P. Kiraly, K. Kudela, M. Stehlik, A.W. Wolfendale, Published by Institute of Experimental Physics Slovak Academy of Sciences. P. 408-411.
11. A.G. Bogdanov et al. Energy spectrum of cosmic ray muons in ~ 100 TeV energy region reconstructed from the BUST data. arXiv:0911.1692v1 [astro-ph.HE].