

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Рубцов Григорий Игоревич

**Статистические методы исследования широких
атмосферных ливней**

01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва–2007

Работа выполнена в Отделе теоретической физики Института ядерных исследований Российской академии наук и на кафедре квантовой статистики и теории поля физического факультета Московского государственного университета им М. В. Ломоносова.

Научные руководители:

доктор физико-математических наук,

академик РАН

В. А. Рубаков

кандидат физико-математических наук

С. В. Троицкий

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

Э. В. Бугаев (ИЯИ РАН)

доктор физико-математических наук

Н. Н. Калмыков (НИИЯФ МГУ)

Ведущая организация:

Институт космофизических исследований и аэронауки

им. Ю. Г. Шафера СО РАН

Защита диссертации состоится « _____ » _____ 2007 г. в _____ час. на заседании Диссертационного совета Д 002.119.01 Института ядерных исследований РАН (117312 Москва, проспект 60-летия Октября, дом 7а).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института ядерных исследований РАН.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2007 г.

Ученый секретарь Совета

кандидат физико-математических наук

Б. А. Тулунов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Более половины века прошло с открытия явления широких атмосферных ливней (ШАЛ), вызванных попадающими в атмосферу частицами высоких энергий. Тем не менее, исследования космических лучей сверхвысоких энергий не перестали быть актуальными сегодня. Более того, разрешение загадок, связанных с космическими лучами сверхвысоких энергий, может пролить свет на неизвестные сегодня физические явления и процессы.

В 1966 году Грейзеном и независимо Зацепиным и Кузьминым было предсказано обрезание спектра космических лучей на энергиях порядка 10^{20} эВ. Предсказание основывалось на том, что протоны с энергией свыше $10^{19.6}$ эВ, пролетая через Вселенную, должны рождать π -мезоны на реликтовых микроволновых фотонах. При каждом взаимодействии, протон в среднем теряет 20% своей энергии, что должно приводить к значительному подавлению спектральной плотности протонов при энергиях порядка и выше 10^{20} эВ. Несмотря на то, что область энергий, относительно которой сделано предсказание, уже много лет подвергается экспериментальному исследованию, однозначного ответа на вопрос о присутствии в спектре ультрафиолетового обрезания до сих пор не получено.

С одной стороны, существование космических лучей с энергиями, превышающими 10^{20} эВ — факт, установленный в независимых экспериментах различного типа. Первое такое событие было зарегистрировано в эксперименте Volcano Ranch в Нью-Мексико, США незадолго до открытия реликтового излучения. Событие с самой высокой измеренной

энергией около $3 \cdot 10^{20}$ эВ наблюдалось в эксперименте Fly's Eye в 1991 году. Эксперимент AGASA (Akeno Giant Air Shower Array), завершивший сбор данных в 2003 году, за период наблюдения зарегистрировал 11 событий с экспериментально оцененными энергиями выше 10^{20} эВ. Якутская комплексная установка ШАЛ, работающая с 1970 года по настоящее время, зарегистрировала 3 события с энергиями в указанном диапазоне. События с энергиями выше 10^{20} также наблюдались во флуоресцентном эксперименте High Resolution Fly's Eye (HiRes) и гибридном эксперименте Pierre Auger.

С другой стороны, результаты современных экспериментов расходятся в отношении обрезания в спектре со статистической значимостью отличия в 2-3 стандартных отклонения и труднооценимыми систематическими различиями. Результаты эксперимента AGASA не указывают на ГЗК-обрезание спектра, тогда как результаты флуоресцентного эксперимента HiRes напротив указывают на то, что ультрафиолетовое обрезание присутствует.

Существование экспериментально наблюдаемых событий с энергиями выше энергии ультрафиолетового обрезания могло бы свидетельствовать о новых физических явлениях при сверхвысоких энергиях. На сегодняшний день предложено несколько возможных объяснений таких событий, среди которых можно отметить модель Z -вспышек, модели распада сверхтяжелых частиц темной материи и модели топологических дефектов. Указанные модели предсказывают значительную долю фотонов в спектре космических лучей сверхвысоких энергий. Указание на присутствии нейтральных частиц в спектре также было получено в работах по исследованию корреляций направлений прихода событий сверхвысоких

энергий с ладертидами.

Основные задачи, решаемые современными экспериментами — определение энергий и направлений прихода первичных частиц, измерение спектра и определение химического состава.

Непосредственно измеряемыми величинами для наземной решетки детекторов являются показания детекторов с учетом информации о временной развертке сигнала, а для флуоресцентного детектора - флуоресцентный сигнал с одного или нескольких телескопов. На основании прямо измеряемых величин в стандартной процедуре обработки определяется направление прихода первичной частицы. Определение энергии и типа первичной частицы в современных экспериментах происходит опосредованно. Сначала на основании непосредственно измеряемых величин вычисляются так называемые “наблюдаемые”, а затем используется связь между наблюдаемыми и параметрами первичной частицы. Выбор наблюдаемых и процедуры их извлечения производится экспериментальной коллаборацией на основании данных об экспериментальных погрешностях. Связь наблюдаемых с параметрами первичной частицы может устанавливаться путем измерений, аналитических расчетов и компьютерного моделирования.

В решетках наземных детекторов в качестве наблюдаемой используется плотность регистрируемого детектором сигнала $S(r_{const})$, приведенная к фиксированному расстоянию от оси ливня r_{const} . Расстояние, к которому приводится плотность, выбирается экспериментальной коллаборацией с целью минимизации флуктуаций плотности и экспериментальных ошибок в определении приведенной плотности на основании показаний детекторов. Традиционно r_{const} выбирают равным 600 мет-

ров, так как на указанном расстоянии от оси ливня ошибки измерения плотности минимальны. Для новых экспериментов, с большими расстояниями между детекторами, r_{const} выбирают равным 1000 метров. При наличии в эксперименте мюонных детекторов, может дополнительно использоваться плотность потока мюонов $\rho_\mu(r_{const'})$. Наземные эксперименты регистрируют время прихода первой частицы на каждый детектор, что позволяет определить кривизну фронта ливня. Новые эксперименты Pierre Auger Observatory (PAO) и Telescope Array (TA) также регистрируют временную развертку сигнала на каждом детекторе, что позволяет определить время нарастания сигнала.

Флуоресцентные детекторы регистрируют продольное развитие ШАЛ. Флуоресцентный свет, испускаемый возбужденными молекулами азота вдоль оси ливня, регистрируется специальным телескопом. Функция продольного распределения является наблюдаемой в экспериментах такого типа. Флуоресцентные эксперименты определяют, в частности, параметр X_{max} — глубину атмосферы, на которой число частиц в ливне максимально, а также число частиц на этой глубине N_{max} .

Развитие широкого атмосферного ливня в атмосфере — сложный каскадный процесс. Высокоэнергетическую часть ШАЛ можно смоделировать численно, путем решения одномерных каскадных уравнений, так как до определенного порога энергий все частицы ливня можно считать движущимися вдоль оси ливня. Моделирование трехмерного развития ливня обычно производится методом Монте-Карло. Для Монте-Карло моделирования доступны несколько программных пакетов, наиболее распространенные из которых CORSIKA (COsmic Ray SIMulations for KAscasc) и AIREX (AIRshower Extended Simulations). В диссертации

используется программный пакет CORSIKA.

В развитии ливней, вызванных первичными фотонами, имеется ряд особенностей. Если в атмосферу попадает фотон с энергией $E \gtrsim 10^{19}$ эВ, то нельзя пренебречь эффектом Ландау, Померанчука и Мигдала, который приводит к подавлению электромагнитного сечения взаимодействия и, как следствие, к задержке первого взаимодействия. Кроме того, ливни, вызванные первичными фотонами сверхвысоких энергий могут начать развиваться в магнитосфере Земли за счет процесса рождения $e^+ e^-$ пар в магнитном поле. Моделирование развития ливня в геомагнитном поле производится с помощью подключаемого модуля PRESHOWER для пакета CORSIKA.

Для сокращения времени расчетов ШАЛ, вызванных частицами сверхвысоких энергий, используется процедура прореживания (thinning). В ней группы частиц заменяются на отдельные эффективные частицы, которым приписываются различные веса. Такая процедура удобна при изучении средних значений наблюдаемых, однако приводит к дополнительным нефизическим флуктуациям. Кроме того, использование эффективных частиц не позволяет исследовать мелкомасштабную структуру ливня и надежно моделировать временную развертку сигнала.

Определение состава первичных частиц сверхвысоких энергий является одной из наиболее актуальных задач: информация о составе позволяет проверить ряд теоретических предсказаний сама по себе, а кроме того, является важным ингредиентом надежного определения энергии. Эту задачу можно представить в виде двух подзадач, первая заключается в разделении фотонной и адронной составляющих, а вторая в опре-

делении массового состава адронной составляющей.

В силу того, что количество событий, зарегистрированных в диапазоне сверхвысоких энергий небольшое, применяемые методы анализа, основанные на средних величинах, становятся неприменимы. Для анализа небольших выборок целесообразна разработка статистических методов пособытийного анализа экспериментальных данных.

Цель работы — разработка статистических методов, позволяющих повысить точность физических выводов и предсказаний, формулируемых с использованием данных современных экспериментов, регистрирующих широкие атмосферные ливни.

Научная новизна и практическая ценность. В диссертации впервые теоретически исследованы мелкомасштабные флуктуации плотности частиц в широких атмосферных ливнях и рассчитан их вклад в погрешности измерения наблюдаемых величин наземными решетками детекторов. Впервые получено распределение величины погрешности, вносимой в наблюдаемые величины физическими мелкомасштабными флуктуациями, показано, что форма распределения отличается от гауссовой.

Предложен новый статистический метод исследования химического состава космических лучей сверхвысоких энергий на основе наблюдаемых для индивидуальных ШАЛ, зарегистрированных в эксперименте. Новым является пособытийный анализ малых наборов экспериментально зарегистрированных ШАЛ и использование в анализе только наблюдаемых величин. Метод позволяет наиболее точно исследовать малые наборы экспериментальных событий и превосходит существующие методы по точности и устойчивости результатов.

В диссертации впервые получены наиболее сильные на сегодня огра-

ничения на долю фотонов в первичном спектре космических лучей сверхвысоких энергий. В диапазоне энергий выше 10^{20} эВ поставлено ограничение на уровне 36% из анализа объединенного набора данных экспериментальной установки AGASA и Якутской комплексной установки широких атмосферных ливней. В диапазонах энергий выше $2 \cdot 10^{19}$ эВ и выше $4 \cdot 10^{19}$ эВ поставлены ограничения на уровнях 12% и 22% соответственно из анализа данных Якутской установки.

Впервые приведено прямое сравнение значений наблюдаемых в искусственных ШАЛ, смоделированных с процедурой прореживания и без нее, получена оценка искусственных флуктуаций, вносимых процедурой прореживания.

Предложен новый метод, позволяющий улучшить точность и скорость вычислений при моделировании широких атмосферных ливней с процедурой прореживания.

Апробация диссертации. Основные результаты, полученные в диссертации, доложены на научных семинарах ИЯИ РАН, ИТФ им. Л. Д. Ландау, кафедры квантовой статистики и теории поля физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, 14-м международном семинаре “Кварки-2006” (Санкт-Петербург), на 29-й международной конференции по космическим лучам (Пуне, Индия, 2005), на трех международных рабочих совещаниях по космическим лучам сверхвысоких энергий и их источникам (Москва, 2004, 2005, 2006), на 23-й международной конференции по физике высоких энергий (Москва, 2006), 13-й международной Ломоносовской конференции по физике элементарных частиц, на 33-й зимней школе ИТЭФ и на 29-й Всероссийской конференции по космическим лучам (Москва, 2006).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 8 работ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав основного текста, заключения и 4 приложений, содержит 111 страниц машинописного текста, в том числе 19 рисунков и список литературы из 105 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается современное состояние исследований спектра и химического состава первичных частиц сверхвысоких энергий. Дается краткое описание современных экспериментов и экспериментальных методик регистрации ШАЛ, вызванных первичными частицами сверхвысоких энергий. Описываются особенности развития ШАЛ, вызванных первичными фотонами. Кратко изложено содержание диссертации.

В первой главе диссертации дается описание метода исследования экспериментальных погрешностей определения наблюдаемых с использованием открытой библиотеки искусственных ШАЛ, смоделированных без использования процедуры прореживания. В разделе 1.1 описываются различные подходы к моделированию ШАЛ, в частности приводится краткое описание пакета CORSIKA и используемых им программных модулей для моделирования взаимодействий.

В разделе 1.2 дается описание прореживания — процедуры, позволяющей значительно сократить время моделирования ливня за счет замены групп частиц, образующихся в актах взаимодействия, на эффективные частицы. Процедура прореживания очень эффективна для широкого класса задач, связанных с определением характеристик ШАЛ, но неприменима к некоторым важным задачам, таким как исследование экспериментальных ошибок, вызванных мелкомасштабными флуктуаци-

ями.

Созданная автором открытая библиотека ШАЛ, смоделированных без использования процедуры прореживания, описана в разделе 1.3. Библиотека ливней позволит проводить исследования, невозможные при использовании процедуры прореживания, без необходимости тратить ресурсы на ресурсоемкое моделирование. Описание новых, недоступных ранее возможностей для анализа, предоставляемых открытой библиотекой приводится в разделе 1.4. Описывается, в частности, возможность детального исследования временной развертки сигнала на детекторе, актуального для новых экспериментов.

Флуктуации плотности числа частиц в ШАЛ на масштабе порядка размера детектора (несколько метров) могут приводить к значительным отклонениям показаний индивидуального детектора от средней плотности числа частиц на заданном расстоянии от оси. В разделе 1.5 описывается метод анализа мелкомасштабных флуктуаций на масштабе размера детектора и дается оценка возможного вклада таких флуктуаций в ошибки измерения наблюдаемых величин в эксперименте. Вычисляется автокорреляционная функция для плотности сцинтилляционного сигнала и мюонной плотности. Показывается, что автокорреляционные функции сцинтилляционного сигнала и мюонной плотности в ШАЛ близки к нулю на масштабах больше или порядка размера детектора. Отмечено, что ливни из открытой библиотеки содержат избыточную информацию по отношению к моделированию регистрации ШАЛ, при котором используется лишь порядка 10^{-6} информации, содержащейся в искусственном ливне. В нашем методе каждый ливень детектируется 30 тысяч раз при различных положениях оси ливня относительно решетки детекторов (и

различных углах поворота ливня), что позволяет эффективно использовать имеющуюся избыточность. Дается обоснование метода.

Оценка величины мелкомасштабных флуктуаций выполнена в разделе 1.6 с использованием данных открытой библиотеки. Вычислена функция распределения величины мелкомасштабных флуктуаций на детекторе, находящемся на расстоянии 600 метров от оси ливня. Завершает главу раздел 1.7, в котором оценен вклад мелкомасштабных флуктуаций в экспериментальную ошибку определения $S(600)$ в эксперименте типа AGASA для первичных энергий порядка 10^{20} эВ. Показано, что относительная величина стандартного отклонения погрешности определения $S(600)$, порожденной мелкомасштабными флуктуациями, составляет 7%. Распределение погрешности измерения $S(600)$ отличается от гауссового и является более пологим в области переоценки, чем в области недооценки энергии. Показано, что ошибка, связанная с мелкомасштабными флуктуациями, является второстепенной для предсказаний относительно ГЗК-обрезания. Обосновывается положение, что будущие эксперименты смогут использовать новые наблюдаемые, в настоящее время измеряемые недостаточно точно.

Вторая глава посвящена описанию статистического метода анализа химического состава первичных частиц сверхвысоких энергий. В разделе 2.1 дается описание существующих методов анализа химического состава, их преимуществ и ограничений. Дается характеристика их применимости к малым экспериментальным наборам ШАЛ, вызванных частицами сверхвысоких энергий. В разделе 2.2 описываются основные составляющие приведенного метода: моделирование искусственных ливней для каждого индивидуального события и отбор искусственных ливней по

значениям наблюдаемых величин, восстановленных с применением процедуры, используемой в эксперименте.

В разделе 2.3 приводится общее описание подхода, основанного на событийном анализе, к исследованию химического состава, далее обсуждается выбор наблюдаемых для широких атмосферных ливней (подраздел 2.3.1). Для наших целей мы разделяем наблюдаемые на две группы, которые мы будем рассматривать различным образом: Е-наблюдаемые — параметры, непосредственно относящиеся к оценке энергии и направления прихода; С-наблюдаемые — параметры, используемые для того, чтобы отличить различные типы первичных частиц.

В подразделе 2.3.2 описываются общие принципы получения ограничений на возможный тип первичной частицы для индивидуального ШАЛ. В наборе исследуемых атмосферных ливней, каждое событие подвергается независимому изучению. Требуется смоделировать некоторое количество искусственных ливней, вызванных первичными частицами различного типа, Е-наблюдаемые которых согласуются с наблюдаемыми значениями в реальных событиях. С этой целью сначала производится моделирование ливней, вызванных первичными частицами различных энергий, а затем для каждого искусственного ливня реконструируются значения Е-наблюдаемых и сравниваются с наблюдаемыми значениями в реальном ливне. Смоделированные события затем участвуют в дальнейшем изучении с весом, пропорциональным оценке того, насколько хорошо их Е-наблюдаемые соответствуют данным. На этом этапе важно использовать ту же процедуру реконструкции, которая использовалась при анализе реальных данных, для чего требуется информация об отклике детектора на частицы различного типа, энергий и углов падения.

Аналогичным образом, следуя процедуре обработки реальных данных, для каждого смоделированного ливня восстанавливаются S -наблюдаемые. Для каждого исследуемого типа первичной частицы находится распределение значений S -наблюдаемых для смоделированных ливней, отобранных по значениям E -наблюдаемых. Процедура завершается сравнением измеренных в эксперименте S -наблюдаемых с распределениями, полученными в результате моделирования, в результате чего вычисляются вероятности того, что наблюдаемый ливень вызван различными первичными частицами.

В подразделе 2.3.3 описывается использование ограничений, полученных для индивидуальных ливней, для получения информации о химическом составе потока первичных частиц из набора событий. Предметом исследования химического состава обычно является поток космических лучей в определенном диапазоне первичных энергий E_0 . Обозначим исследуемый диапазон как $\{E\}$; это может быть как интервал ($E_1 < E_0 < E_2$) так и полупрямая. В общем случае, ограничения по энергии могут быть дополнены ограничениями по направлениям прихода, если исследованию подлежит конкретный участок неба.

Затем следует определить набор данных для исследования. Несмотря на то, что реконструированные энергии для выбранных событий должны соответствовать исследуемому диапазону энергий, должна быть учтена также возможность неправильного восстановления энергии в эксперименте. В связи с этим предпочтительным является расширение рассматриваемого диапазона реконструированных энергий. В идеальном случае, все данные, зарегистрированные в эксперименте, должны войти в исследуемый набор, при том, что большинство из них будет иметь пренебре-

жимо малое влияние влияние на интересующие величины.

Каждое индивидуальное событие в реальной выборке должно быть исследовано согласно описанию, приведенному в подразделе 2.3.2. Для каждого события и для каждого типа первичной частицы, должны быть получены два распределения С-параметров смоделированных событий:

1. для событий, согласующихся с реальными по Е-параметрам и имеющих брошенные энергии в исследуемом диапазоне $E_0 \in \{E\}$
2. для событий, согласующихся с реальными по Е-параметрам и имеющих брошенные энергии вне исследуемого диапазона $E_0 \notin \{E\}$.

Независимые вероятности рассчитываются для каждого из случаев. Над ансамблем полученных вероятностей для всех реальных событий производится комбинаторный анализ, результатом которого могут стать либо ограничения, либо наиболее вероятные модельные параметры для химического состава потока первичных космических лучей в диапазоне энергий $\{E\}$. На этой завершающей стадии процедуры производится учет “потерянных событий”. Этим термином мы называем события, которые имеют брошенные энергии в исследуемом диапазоне $E_0 \in \{E\}$, но тем не менее выпадают из нашего рассмотрения в силу того, что реконструированные энергии сильно отличаются от E_0 или из-за отбора экспериментальных событий.

Раздел 2.4 содержит подробное описание процедуры, обрисованной в разделе 2.2, и готовые к использованию формулы, реализующие указанную процедуру.

Раздел 2.5 содержит несколько примеров, иллюстрирующих метод в применении к анализу небольших наборов событий, для которых неприменимы традиционные методы, основанные на усреднении. Мы рассматриваем только одну наблюдаемую, связанную с химическим составом, а

именно, плотность числа мюонов, и используем наборы событий сверхвысоких энергий AGASA и Якутской установки в качестве примеров. В подразделе 2.5.1 мы детально анализируем наиболее энергичное событие, зарегистрированное в AGASA. Алгоритм определения наиболее вероятного химического состава в предположении двух возможных типов первичных частиц проиллюстрирован в подразделе 2.5.2 на наборе из 4 событий с энергиями выше $1.5 \cdot 10^{20}$ эВ, зарегистрированных в экспериментах AGASA и Якутской установки. Используемая выборка небольшая, поэтому раздел 2.5 служит только для иллюстрации. Проверка корректности метода на искусственных выборках проводится в разделе 2.5.4. Особенности применения, возможности и ограничения метода описаны в разделе 2.6.

Применение метода к наборам экспериментальных данных AGASA и Якутска и получение наиболее точных на сегодняшний день ограничений на долю фотонов сверхвысоких энергий в диапазонах $E_0 > 2 \cdot 10^{19}$ эВ, $E_0 > 4 \cdot 10^{19}$ эВ и $E_0 > 10^{20}$ эВ описано в разделе 2.7. В подразделе 2.7.1 получено ограничение на долю фотонов в первичном спектре в диапазонах энергий выше $2 \cdot 10^{19}$ эВ и выше $4 \cdot 10^{19}$ эВ на уровнях 12% и 22% соответственно из анализа данных Якутской комплексной установки широких атмосферных ливней. В подразделе 2.7.2 получено ограничение на долю фотонов в первичном спектре в диапазоне энергий выше 10^{20} эВ на уровне 36% из анализа объединенного набора данных экспериментальной установки AGASA и Якутской установки. Устойчивость полученных результатов по отношению к различным возможным систематическим неопределенностям обсуждается в подразделе 2.7.3. В разделе 2.7.4 приводится сравнение результатов с полученными ранее.

Точность определения химического состава зависит от ширин распределений наблюдаемых величин в искусственных ливнях, используемых для анализа. Указанные ширины включают в себя вклад искусственных флуктуаций, понижающий точность анализа.

В третьей главе производится оценка относительной величины искусственных флуктуаций, связанных с использованием процедуры прореживания, и предлагается метод, позволяющий повысить точность восстановления распределения наблюдаемых величин по сравнению с традиционной процедурой прореживания. В разделе 3.1 проведен количественный анализ искусственных флуктуаций, связанных с процедурой прореживания. В подразделе 3.1.1 выполнена оценка влияния искусственных флуктуаций на определение средних значений наблюдаемых, в подразделе 3.1.2 — оценка влияния флуктуаций на ширину распределения значений наблюдаемых, играющую ключевую роль в исследованиях химического состава. В разделе 3.2 дается описание различных способов уменьшения искусственных флуктуаций: настройки параметров процедуры прореживания и использования гибридных кодов. Метод, позволяющий эффективно подавлять нефизические флуктуации при исследовании распределений наблюдаемых величин, предложен в разделе 3.3. Описание метода приводится в подразделе 3.3.1. Примеры применения и количественные оценки эффективности метода приведены в подразделе 3.3.2. Возможное обобщение метода описано в подразделе 3.3.3.

В Заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

Некоторые используемые обозначения собраны в приложении А. В приложении Б описана процедура преддетектирования, используемая

для увеличения скорости анализа наблюдаемых с использованием ливней, смоделированных без прореживания. В приложениях В и Г описаны процедуры определения энергии и мюонной плотности в эксперименте AGASA и на Якутской установке.

Для защиты выдвигаются следующие результаты, полученные в диссертации:

1. Предложен метод исследования мелкомасштабных флуктуаций плотности частиц в широких атмосферных ливнях. Показано, что флуктуации могут приводить к негауссовой ошибке при измерении наблюдаемых наземной решеткой детекторов. Впервые получена теоретическая оценка экспериментальных ошибок, связанных с мелкомасштабными флуктуациями.
2. Предложен статистический метод анализа химического состава широких атмосферных ливней на основе экспериментальных наблюдаемых для индивидуальных событий. Метод особенно эффективен для малых наборов экспериментальных данных, что имеет место в области сверхвысоких энергий.
3. Получено ограничение на долю фотонов в первичном спектре в диапазоне энергий выше 10^{20} эВ на уровне 36%. Ограничение получено из анализа объединенного набора данных экспериментальной установки AGASA и Якутской комплексной установки широких атмосферных ливней. Полученное ограничение является лучшим на сегодняшний день в указанном диапазоне энергий и существенно ограничивает параметры моделей, объясняющих частицы сверхвысоких энергий выше порога обрезания Грейзена-Зацепина-Кузьмина с помощью Z -вспышек и сверхтяжелой темной материи.

4. Получено ограничение на долю фотонов в первичном спектре в диапазонах энергий выше $2 \cdot 10^{19}$ эВ и выше $4 \cdot 10^{19}$ эВ на уровнях 12% и 22%, соответственно. Ограничение получено из анализа данных Якутской комплексной установки широких атмосферных ливней. Полученное ограничение является лучшим на сегодняшний день в указанном диапазоне энергий.
5. Путем прямого сравнения ливней, смоделированных с применением процедуры прореживания и без нее, изучены искусственные флуктуации, вносимые этой процедурой в значения наблюдаемых величин.
6. Предложен метод, позволяющий улучшить точность и скорость вычислений при моделировании широких атмосферных ливней с процедурой прореживания.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. G. I. Rubtsov, L. G. Dedenko, G. F. Fedorova, E. Y. Fedunin, A. V. Glushkov, D. S. Gorbunov, I. T. Makarov, M. I. Pravdin, T. M. Roganova, I. E. Sleptsov, S. V. Troitsky. Upper limit on the ultra-high-energy photon flux from AGASA and Yakutsk data // -Phys. Rev. -2006. -D73. -p.063009.
2. A. V. Glushkov, D. S. Gorbunov, I. T. Makarov, M. I. Pravdin, G. I. Rubtsov, I. E. Sleptsov, S. V. Troitsky. Constraining the fraction of primary gamma rays at ultra- high energies from the muon data of the Yakutsk extensive-air-shower array // -Письма в ЖЭТФ. -2007. -85. -С.163–167.
3. L. G. Dedenko, G. F. Fedorova, T. M. Roganova, M. I. Pravdin, I. E. Sleptsov, V. A. Kolosov, A. V. Glushkov, D. S. Gorbunov,

- G. I. Rubstov, S. V. Troitsky. Possible observation of new physics in ultrahigh-energy cosmic rays // -Ядерная физика. -2007. -70-1. -С.170–174.
4. D. S. Gorbunov, G. I. Rubtsov, S. V. Troitsky. Towards event-by-event studies of the ultrahigh-energy cosmic-ray composition // -astro-ph/0606442.
 5. G. I. Rubtsov. Energy estimation of photon-induced extensive air showers // -Surveys High Energ. Phys. -2004. -19. -p.219–221.
 6. L. G. Dedenko, G. F. Fedorova, T. M. Roganova, M. I. Pravdin, I. Y. Sleptsov, V. A. Kolosov, A. V. Glushkov, D. S. Gorbunov, G. I. Rubtsov, S. V. Troitsky. Estimates of the muon signal in giant air showers induced by the primary photons // -Proceedings of the 29th International Cosmic Ray Conference, Pune. -2005. -7. -p.211.
 7. G. I. Rubtsov. Small-scale fluctuations of extensive air showers as the origin of energy estimation systematics // -Труды 13-ой международной Ломоносовской конференции по физике элементарных частиц. -World Scientific Publishing. -2006. -С.185-188.
 8. V. A. Kuzmin, G. I. Rubtsov. No-thinning simulations of extensive air showers and small scale fluctuations at the ground level // -astro-ph/0702527