

ТОМСКИЙ ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ТРУДОВОГО
КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМ С. М. КИРОВА

На правах рукописи

Конопелько Александр Козьмич

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАММА-АСТРОНОМИЧЕСКОГО
ЭКСПЕРЕМЕНТА СВЕРХВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

(01.04.16 – физика ядра и элементарных частиц)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

ТОМСК – 1990

Работа выполнена в Томском ордена Октябрьской революции и Трудового Красного Знамени политехническом институте им. С. М. Кирова

Научный руководитель – доктор физико-математических наук,
профессор Кольчужкин А. М.

Официальные оппоненты – доктор физико-математических наук,
Ерлыкин А. Д. (ФИАН СССР, г. Москва)

кандидат физико-математических наук,
Рыжов В.В. (ИСЭ СО АН СССР, г.Томск)

Ведущая организация – Ереванский физический институт.

Защита состоится _____ 199_г. в ___ часов на заседании специализированного Совета К 063.80.02 в Томском политехническом институте им С. М. Кирова (634004, г. Томск, пр. Ленина, 30, Томский политехнический институт).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ТПИ.

Ученый секретарь
специализированного Совета

В.К. Кононов

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Целью гамма - астрономического эксперимента сверхвысокой энергии является регистрация потоков гамма-излучения в диапазоне энергии $0.1 \cdot 10$ ТэВ как от дискретных источников, так и диффузионного происхождения. Анализ экспериментально регистрируемых потоков гчмч излучения позволяет судить о характере физических процессов, происходящих в недрах изучаемых космических объектов.

Широкое распространение в гамма - астрономии сверхвысокой энергии получила техника, основанная на регистрации черенковского света от широких атмосферных ливней (ШАЛ). В настоящее время в мире эксплуатируется, в также разрабатывается целый ряд черенковских гамма-телескопов сверхвысокой энергии.

Основная проблема гамма - астрономических наблюдений сверхвысокой энергии с использованием черенковской техники состоит в необходимости выделения полезного сигнала на фоне большого числа ливней, порождаемых заряженной компонентой первичных космических лучей (ПКЛ). Интенсивность фона, как правило, в сотни, раз превышает ожидаемые потоки гамма-излучения. Регистрируемый избыток в числе ШАЛ в направлении на предполагаемый источник, является свидетельством наличия гамма-излучения от объекта в рассматриваемом диапазоне энергии.

Получение статистически обоснованного результата в выделении избытка при значительном числе фоновых событий затруднено длительностью времени проведения гамма-астрономических наблюдений за изучаемым объектом (год и более). Поэтому существенный прогресс в повышении эффективности гамма-астрономического эксперимента сверх-высокой энергии в настоящее время связывается с возможностью осуществлять при обработке результатов наблюдений режекцию протон-ядерного компонента ПКЛ на основе анализа двумерных угловых черенковских образов ШАЛ, регистрируемых гамма-телескопами с многоканальными светоприемщиками. В связи с этим, актуальным является разработка эффективных методов дискриминации фоновых ливней ПКЛ по параметрам черенковского образа ШАЛ, а также оптимизация конструкции и условий эксплуатации черенковских гамма-телескопов с многоканальными светоприемщиками на базе численного моделирования методом Монте-Карло конкретного гамма-астрономического эксперимента.

Совершенствований методов режекции протон-ядерных

ливней ПКЛ позволяет существенно повысить статистическую достоверность гамма-астрономических наблюдений. Это делает возможным получение более детальной информации о космических источниках гамма-излучения сверхвысокой энергии, в частности, изучение их энергетического спектра. Поэтому актуальным является разработка методов измерения энергии гамма-ливней, способов определения параметров энергетического спектра гамма-излучения от локальных космических объектов при регистрации черенковских образов ШАЛ гамма-телескопами с многоканальными светоприемниками, а также проведение оценок достигаемой при этом точности.

При теоретическом рассмотрении указанных выше задач чрезвычайно важным является вопрос точного учета всех физических флуктуаций изучаемых процессов в используемых алгоритмах моделирования. Вследствие этого, насомненный интерес в методическом плане представляет анализ точности учета флуктуаций в существующих на сегодняшний день расчетных методах.

Для поиска гамма-источников в диапазоне ультравысокой энергии (> 100 ТэВ) в настоящее время сооружаются установки по регистрации электромагнитной и мюонной компоненты ШАЛ. Самыми крупными из них являются детектор CASA (США), ШАЛ-1000 (СССР).

Созданию той или иной установки по регистрации ШАЛ, как правило, предшествуют обширные модельные расчеты различных характеристик гамма- и протон ядерных ливней ПКЛ в атмосфере применительно к условиям регистрации данной установки. Подобные расчеты проводятся с целью оптимизации расположения детекторов установки, расчета эффективной чувствительной площади регистрации, позволяющей оценить минимальную величину интенсивности доступных для исследования потоков гамма-излучения. В связи с этим, актуальным является проведение систематических расчетов функций пространственного распределения (ФПР) потока электронов, энергопотерь в оцинтиляционном детекторе, полного потока энергии для электронно-фотонного каскада (ЭФК) ультравысокой энергии, развивающегося в атмосфере.

Решению указанного выше круга задач посвящена настоящая диссертационная работа.

Целью данной работы являются:

1. Реализация алгоритмов моделирования методом Монте-Карло электронно-фотонного Фотонного и ядерного каскадов сверхвысокой и ультравысокой энергии, развивающихся в атмосфере, применительно к задаче расчета пространственно-угловых характеристик черенковского света, а также пространственного распределения электромагнитной компоненты ШАЛ, с учетом особенностей регистрации в конкретном гамма-астрономическом эксперименте.

2. Разработка на базе численного моделирования гамма-астрономического эксперимента сверхвысокой энергии эффективных методов отбора полезных событий и рожекции протон ядерных ливней ПКЛ, позволяющих существенно повысить уровень достоверности получаемых в эксперименте результатов, а также сократить время наблюдений.

3. Оптимизация конструкции и условий эксплуатации черенковских гамма-телескопов с многоканальными светоприемниками с целью достижения наивысшей эффективности дискриминации фоновых ливней.

4. Разработка методов измерения энергии гамма-ливней, а также методов определения формы энергетического спектра гамма-излучения от локальных космических источников по результатам наблюдений, полученных на установках по регистрации черенковского света ШАЛ сверхвысокой энергии.

5. Проведение систематических расчетов пространственного распределения частиц ЭФК ультравысокой энергии в атмосфере с учетом свойств используемых детекторов частиц.

Новизна работы. К числу новых результатов следует отнести проведенный анализ величины флуктуации черенковского света ШАЛ, регистрируемого гамма телескопом сверхвысокой энергии. Показано, что высокий уровень флуктуации в числе черенковских фотонов, регистрируемых, телескопом с конечной площадью зеркала, определяется кластерной структурой сигнала в детекторе.

Исследована зависимость эффективности методов дискриминации ливней ПКЛ по параметрам черенковского образа ШАЛ от величины угла обзора гамма-телескопа, углового размера ФЭУ светоприемника, используемого мастерного критерия запуска установки площади приемного зеркала. Рассмотрим вопрос выбора оптимальной конфигурации светоприемника и условий запуска установки в полях достижения максимального отношения «сигнал/флуктуации фона» на примере гамма-телескопа

обсерватории им. Уипла (США) (в дальнейшем PLWO) и крупномасштабного международного эксперимента HEGRA, Обоснован вывод о возможности повышении эффективности дискриминации фоновых событий в 2 раза при сокращении угловых размеров ФЭУ светоприемника до 0.25° вместо традиционно используемых $0.4+0.5^\circ$.

Впервые многомерный корреляционный анализ, основанный на решающих правилах Байеса и непараметрическом способе оценивания многомерной плотности вероятности, применен в задаче классификации гамма- и протон-ядерных ливней по параметрам двумерного черенковского образа ШАЛ, регистрируемых гамма-телескопом сверхвысокой энергии. Показано, что данный подход обеспечивает достижение существенно более высокого эффукта в выделении полезного сигнала по сравнению с одномерными и многопараметрическими методами, известными ранее. Оригинальным является также рассмотрение возможностей методов дискриминации фоновых событий в рамках указанного подхода для случая системы черенковских гамма - телескопов установки HEGRA.

Предлагается и обосновывается новая методика намерения энергии гамма-ливней по параметрам черенковского образа ШАЛ, регистрируемого одиночным или системой гамма-телескопов с многоканальными светоприемниками, обеспечивающая достаточно высокое энергетическое разрешение.

Показано, что использование эффективных методов режекции фоновых ливней ПКЛ и рассматриваемых методов измерения энергии гамма-ливней обеспечивает возможность проведения исследований дифференциального энергетического спектра гамма-излучения локальных космических объектов. Дается оценка достигаемой при этом точности восстановления параметров энергетического спектра.

Впервые проведены систематические расчеты ФПР полного потока электронов, энерговыведения в оцинтилляционном детекторе, полного потока энергии частиц ЭФК, развивающегося в атмосфере, в широком диапазоне значений первичной энергии $0.1+10^4$ ТэВ, для расстояний от оси ливня (1+500) м. Демонстрируется, что на форму пространственного распределения электронов ЭФК, развивающегося в атмосфере, существенное влияние оказывают геометрический и переходный эффекты в используемых детекторах частиц.

Научная и практическая ценность диссертационной работы определяется развитием методов обработки экспериментальных данных, получаемых в гамма - астрономическом эксперименте сверхвысокой энергии. Оригинальный подход, обеспечивающий высокую эффективность отбора гамма-ливней и режекции протон-ядерного компонента ПКЛ по комбинации параметров черенковского образа ШАЛ, рекомендации в отношении оптимальной конфигурации светоприемника и условий запуска гамма-телескопа, а также методы измерения энергии гамма-ливней и определения параметров энергетического спектра гамма-излучения сверхвысокой энергии от локальных космических источников находят в настоящее время применение на эксплуатирующихся и строящихся экспериментальных установках: обсерватории им. Уипла, ЕрФИ, HEGRA. Систематические расчеты ФПР полного потока электронов, энергопотерь в сцинтилляторе, полного потока энергии частиц ЭФК ультравысокой энергии, развивающегося в атмосфере, представляют непосредственный практический интерес при обработке экспериментальных данных, получаемых на установках по регистрации ШАЛ, в частности, на Тянь-Шаньской высокогорной станции ФИАН СССР.

На защиту выносятся:

1. Теоретический анализ зависимости максимально достигаемой эффективности дискриминации фоновых ливней ПКЛ на черенковском гамма-телескопе с многоканальным светоприемником от аппаратуры угла обзора, углового размера ФЭУ светоприемника, мастерного критерия отбора событий, площади приемного зеркала.

2. Вывод о возможности повышения в два раза эффективности дискриминации фоновых ливней ПКЛ при уменьшении углового размера ФЭУ с традиционно используемого $0.4-0.5^\circ$ до 0.25° .

3. Оригинальный метод дискриминации фоновых ливней ПКЛ в гамма-астрономическом эксперименте сверхвысокой энергии, учитывающей различия в корреляциях параметров двумерных черенковских образов гамма - и протон ядерных ливней и позволяющей достигать подавления Фона до < 0.5 % при сохранении эффективности регистрации гамма ливней на уровне $30+50$ %, как для случая одиночного гамма - телескопа с большой площадью, так и системы гамма - телескопов с периодами малой площади.

4. Новая методика измерения энергии гамма-ливней по параметрам двумерного черенковского образа для одиночного и системы гамма-телескопов сверхвысокой энергии.

5. Методика определения по показаниям гамма-телескопа формы энергетического спектра гамма-излучения от локальных космических источников, обеспечивающая достаточно высокую точность для существующих и строящихся гамма-телескопов при условии использования развитых в диссертации методов дискриминации фоновых ШАЛ.

6. Результаты массовых расчетов ФПР полного потока электронов, энергопотерь в сцинтилляционном детекторе, полного потока энергии частиц ЭФК, развивающегося в атмосфере, в диапазоне значений первичной энергии $0.1 \cdot 10^4$ ТэВ и расстояний от оси ливня (1+500) м.

7. Вывод о важности учета геометрического и переходного эффектов в сцинтилляционных и годоскопических детекторах частиц ЭФК ультравысокой энергии, развивающихся в атмосфере.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на Всесоюзной школе "Неупругие взаимодействия адронов и ядер при сверхвысоких энергиях" (Нор-Амберд, 1988, 1990), на Всесоюзном семинаре по рентгеновской и гамма-астрономии (Звенигород, 1990), а также представлены в трудах Всесоюзной конференции по космическим лучам (Тбилиси, 1986; Алма-Ата, 1989). Международных конференций по космическим лучам (Москва, 1987; Adelaide, 1990), международного семинара по гамма-астрономии сверхвысокой энергии (Симферополь, 1989). Кроме того, результаты работы докладывались на научных семинарах в ЕрФИ, КраО АН СССР, НИИ ЯФ МГУ, ФИАН СССР.

Личное участие автора. Постановка задач, рассмотренных в диссертации, их теоретическое обоснование, а также некоторые выводы сделаны автором совместно с Пляшешниковым А.В. Реализация метода расчета на ЭШМ, а также анализ результатов выполнены автором самостоятельно.

Публикации. Основные результаты диссертации представлены в II печатных работах, из которых 7 опубликовано в международных и центральных изданиях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения с общим объемом 157 страниц, включая 28 рисунков и 21 таблицу. Список литературы содержит 113 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, определяется цель работы, обсуждается новизна, научная и практическая ценность исследования, дается краткое изложение содержания диссертации.

В первой главе обсуждается вопрос о применимости численных методов, традиционно используемых в расчетах различных характеристик ШАЛ, для теоретического рассмотрения задач гамма-астрономии сверхвысокой энергии. Делается вывод, что наиболее последовательным является моделирование гамма-астрономического эксперимента методом Монте-Карло, так как только такой подход позволяет в полной мере учесть всю специфику рассматриваемых процессов. Дается описание расчетной схемы полного метода Монте-Карло, используемого для Моделирования ЭФК в атмосфере, а также полуаналитического метода Монте-Карло (Plyasheshnikov A.V., Vorobiev K.V., 1981), нашедшего в данной работе применение в расчетах характеристик ЭФК ультравысокой энергии.

Описываются особенности моделирования методом Монте-Карло процессов испускания и регистрации черепковского свото ШАЛ в гамма-астрономическом эксперименте сверхвысокой энергии. При этом процедура генерации случайных двумерных черенковских образов гамма- и протон-ядерных ливней, представляющих собой матрицу амплитуд сигналов ФЭУ многоканального светоприемника, максимально приближена к условиям проведения конкретного эксперимента.

Расчет параметров черенковского образа производился по методике, аналогичной применяемой в эксперименте (Gibbs K., 1986). Представлены основные параметры рассматриваемых в работе экспериментальных установок: гамма-телескоп обсерватории FLWO, система черенковских телескопов HEGR. Обсуждаются структура банков двумерных черенковских образов ШАЛ, сформированных методом Монте-Карло применительно к указанным выше экспериментальным установкам.

Излагаются методики расчета пространствующих характеристик ЭФК ультравысокой энергии с учетом свойств детекторов частиц, основанная на комбинации полного и полуаналитического методов Монте-Карло.

Дается краткое описание используемой в расчетах характеристик черенковского света ШАЛ модели ядрон-ядерных взаимодействий, основанной на инклюзивных спектрах (HILLAS A.M., 1979), полученных в

предположении радиального скейлинга.

Хорошее согласие представляемых в работе распределений значений параметров черенковского образа ШАЛ с результатами независимого моделирования (HILLAS A.M., 1985) и экспериментальными данными (Cawley M., 1990) является свидетельством состоятельности используемой в настоящей работе расчетной схемы метода Монте-Карло.

Анализируется природе флуктуаций числа черенковских фотонов ЭФК сверхвысокой энергии, регистрируемых γ -телескопом с конечной площадью приемного зеркала. Показано, что флуктуации числа фотоэлектронов, выбиваемых с катода ФЭУ светоприемника гамма-телескопа с хорошей точностью аппроксимируются выражением следующего вида:

$$\sigma \frac{2}{j} = \sigma \frac{2}{f(r)} + \frac{n}{N} + \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon N}$$

где $\sigma_{f(r)}$ - Флуктуации плотности потока черенковских фотонов в точке размещения детектора r , N , - среднее число регистрируемых детектором черенковских фотонов, ε - средний квантовый выход ФЭУ,

n - среднее число черенковских фотонов в одном кластере, приходящем в светоприемник телескопа. Каждый кластер содержит фотоны, испускаемые одним из "светящихся" электронов ливня за время, в течении которого конус черенковского излучения пересекает поверхность приемного зеркала.

Показано, что использование известных схем неполного метода Монте-Карло с пуассоновской рандомизацией вкладов приводит к значительному занижению уровня флуктуаций в числе черенковских регистрируемых гамма-телескопом. В этой связи делается вывод о том, что при рассмотрении задач гамма-астрономии сверхвысокой энергии. требующих корректного учета флуктуаций всех изучаемых процессов, наиболее оправданным является использование полного метода Монте-Карло, несмотря на относительно высокую трудоемкость этого метода.

Комплекс вычислительных программ, реализующих рассматриваемые алгоритмы моделирования, написан на алгоритмическом языке FORTRAN. Расчеты проводились на ЭВМ типа ЕС, PDP, VAX.

Вторая глава посвящена теоретическому анализу эффективности методов дискриминации фоновых ливней ПКЛ на черенковских гамма-телескопах сверхвысокой энергии.

В начале главы дается краткая историческая справка развития представлений по проблеме дискриминации протон-ядерных ливней ПКЛ по параметрам двумерного

черенковского образа ШАЛ, регистрируемого гамма-телескопом с многоканальным светоприемником, а также обзор основных результатов, полученных в этом направлении к настоящему времени.

Далее представлены результаты расчетов эффективных площадей и энергетического порога регистрации для одиночного и системы гамма - телескопа HEGRA. Обсуждается характер зависимости эффективных площадей регистрации гамма- (S_{γ}) и протон-ядерных ливней ПКЛ (S_{er}) от первичной энергии ливня E .

Показано, что во всем рассматриваемом диапазоне энергии E справедливо соотношение $S_{\gamma} \propto S_{er}$. Данный результат важен при определении энергетического порога установки, а также для корректной оценки абсолютной величины потока гамма-излучения, регистрируемого телескопом.

Проводится анализ зависимости величины максимально достигаемого отношения "сигнал/Флуктуации фона" при использовании "жесткого" и "мягкого" критериев отбора событий от конфигурации светоприемника, используемого мастерного критерия, площади зеркала гамма- телескопа. Результаты расчетов, проведенных применительно к гамма-телескопу FLWO, свидетельствуют о целесообразности уменьшения угловых размеров ФЭУ светоприемника с традиционно используемых $0.4+0.5^{\circ}$ до 0.25° , что обеспечивает увеличение эффективности дискриминации приблизительно в 2 раза. Данный выход в настоящее время подтвержден экспериментально (Gawley M. et al, 1990). Найден оптимум в размере температуры многоканального светоприемника -3.5° точки зрения достижения максимальной эффективности фоновых ливней. Показано, что для одиночного гамма- телескопа оказывается выгодным и с пользование более жесткого критерия отбора событий, чем критерий, определяемый из соображений надежного подавления фонового свечения ночного неба.

Величина максамально достигаемой эффективности дискриминации определяется уровнем флуктуаций регистрируемого черенковского образа ШАЛ, зависящим в свою очередь от площади зеркала гамма-телескопа. На примере телескопов FLWO и HEGRA, имеющих существенно различные площади зеркала 5 и 76 м², показано, что для случая телескопа с большей площадью зеркала метода "мягкого" отбора событий обеспечивают больший эффект в увеличении отношения "сигнал/Флуктуация фона".

Многомерный анализ теории распознавания образов применен к задаче классификации гамма - и протон ядерных события по параметрам черенковского образа ШАЛ. На основе одномерных статистических текстов и

корреляционного анализа осуществлен выбор наилучших комбинаций признаков. В качестве условия отбора событий использовались решающие правила Байеса. Многомерные плотности условий вероятностей вычислялись с использованием непараметрического способа оценивания на основе модифицированного Парзеневского ядра. Расчеты показали, что применение данного подхода при анализе черенковских образов, регистрируемых на установке FLWO (в случае основной конфигурации с угловым размером ФЗУ $\sim 0,5^\circ$ светоприемника) позволяет проводить режекцию фоновых ливней ПКЛ до уровня $\sim 0.5\%$, сохраняя эффективность регистрации гамма-ливней $\sim 50\%$, что соответствует эффективности дискриминации ~ 7 . При использовании светоприемника с угловыми размерами ФЗУ $\sim 0.25^\circ$ максимально достигаемая величина эффективности дискриминации составляют $\sim 10+14$. Многомерный корреляционный анализ обеспечивает выигрыш в увеличении отношения "сигнал/флуктуации фона" по сравнению с одномерными и многопараметрическими методами отбора событий, использовавшимися ранее.

Предоставляются результаты применения многомерного корреляционного анализа при рассмотрении возможностей системы гамма-телескопов NEGRA. Для случая 3-х телескопов достигаемые значения эффективности дискриминации $\sim 5+8$, что сопоставимо с результатами для случая одиночного телескопа с большой площадью зеркала FLWO. Поскольку для системы гамма-телескопов эффективная площадь регистрации гамма-квантов существенно больше, то даже при сопоставимых значениях эффективности дискриминации, достигаемых в обоих случаях, система телескопов обеспечивает выигрыш в числе регистрируемых гамма-ливней.

Третья глава посвящена рассмотрению разработанной нами оригинальной методики определения энергетического спектра космических источников гамма-излучения сверхвысокой энергии по показаниям черенковских гамма-телескопов.

Указанная методика предполагает наличие возможности приближенного измерения гамма-телескопом (или системой гамма-телескопов) энергии гамма-ливней. В этой связи, в работе предлагаются новые методы измерения энергии Гамма-квантов от локальных космических объектов с помощью черенковских гамма-телескопов.

В случае одиночного гамма-телескопа для измерения энергии предлагается использовать величину смещения максимума светового пятна в фокальной плоскости телескопа θ и суммарной интенсивности вспышки J . На основе бланка события, сформированного применительно к

гамма- телескопу обсерватории им. Уипла, построена оценка энергии гамма- ливней $\varepsilon = \varepsilon(\theta, J)$ в классе полиномиальных функций. При этом использовались условия: несмещенность оценки для фиксированного набора первичных энергий и минимальность ее дисперсии. Данный метод измерения энергии обеспечивает энергетическое разрешение $\sim 30+40\%$.

Для случая системы трех гамма-телескопов, располагая информацией об ориентации и смещении черенковского образа в фокальной плоскости для каждого из телескопов, можно определить с хорошей точностью координаты точки пересечения оси гамма - ливня с уровнем наблюдения. При этом, для тройки гамма- телескопов установки HEGRA погрешность в измерении прицельного параметра для каждого телескопа в системе не превышает $\sim 25\%$. Значения прицельных параметров и амплитуд вспышек в тройке гамма-телескопов установки HEGRA позволяют построить оценку энергии гамма- ливней подобную случаю одиночного телескопа и обеспечивающую несколько более высокую точность измерений энергии ($\sim 20*25\%$).

В диссертационной работе излагается оригинальный способ определения параметров энергетического спектра гамма- источников, применимый на установках, работающих в режиме исследуемого космического объекта. В таком эксперименте определяется избыток μ в числе зарегистрированных телескопом событий за одинаковое время наблюдений в двух режимах работы: при отслеживании источника на небесной сфере (ON) и в случае измерения числа фоновых событий (Cff). $\mu = ON - OFF$. Идея рассматриваемого подхода состоит в проведении дополнительной сортировки зарегистрированных гамма- телескопом событий по условию отбора:

$$\varepsilon = f(v_1 \dots v_k) > E \quad (2)$$

где f - оценочная формула для энергии гамма-ливня, $v_1 \dots v_k$ - набор экспериментально измеряемых параметров череновского образа ливня, E - некоторое фиксированное значение энергии.

В работе обосновывается возможность определения параметров энергетического спектра гамма- источника в предположении его степенного вида $f(E) = AE^{-\gamma}$ на основе экспериментально измеряемых величин μ и μ / μ_0 , где μ_0 - величина избытка для событий, удовлетворяющих условию отбора (2). На основе подобного банка череновских образов гамма- и протон- ядерных ливней в атмосфере, рассчитанного применительно к условиям регистрации гамма- телескопа обсерватории им. Уипла методом Монте-Карло, проведена оценка точности определения параметров

A, γ , а также интегрального спектра $F_{\gamma} = AE^{\gamma+1}/(\gamma-1)$.

Показано, что точность определения параметров A, γ, F_{γ} увеличивается с ростом величины R (отношения полезного сигнала к флуктуациям фона) но закону R^{-1} . Минимальная относительная погрешность определения параметров энергетического спектра при реально достижимых значениях $R=10+20$ (применяя дискриминацию по параметрам черенковского образа ШАЛ) составляет $\delta_{\gamma} \sim 5+10 \%$, $OF = A \sim 10+20 \%$.

В четвертой главе дается обзор имеющихся в литературе численных данных по функциям пространственного распределения (ФПР) потока электронов в ЭФК ультравысокой энергии, развивающегося в атмосфере.

Предоставляются новые результаты массовых расчетов ФПР полного потока электронов ЭФК в атмосфере, выполненные полуаналитическим методом Монте-Карло в широком диапазоне изменения первичной энергии каскада $E_{\gamma} = 10^2+10^7$ ГэВ, для интервала глубин $t=(0.4+3.0)t_{\max}$, где t_{\max} глубина максимума ливня и расстояния от оси ливня $r=(1+500)$ м.

Численные данные по ФПР полного потока электронов ЭФК в атмосфере представлены в виде аппроксимационной формулы, в которой инвариантная по энергии часть распределения в формуле функции НКР с масштабным множителем (Lagutin A. A. et al., 1979), к которой обавлены соответствующие корректирующие множители. Погрешность воспроизведения аппроксимационной формулой численных данных не превышает $\sim 15 \%$.

Для анализа влияния детекторов частиц (сцинтиллятор годоскоп) на форму ФПР потока частиц в работе проведены расчеты ФПР сигнала в модельном газоразрядном счетчике, энерговыделения в сцинтилляторе в тех же диапазонах измерения переменных E, t, r , что и для случая расчета ФПР полного потока электронов. Показано, что влияние на форму регистрируемой ФПР можно охарактеризовать с помощью геометрического и переходного эффектов. Величина геометрического эффекта может достигать $\sim 50\%$, а величина переходного эффекта до $\sim 30+40\%$.

Массовые расчеты коэффициента переходного эффекта для сцинтилляционного детектора (толщина $d=5$ и 10 см) показали, что его величина слабо зависит от первичной энергии ЭФК и определяется расстоянием от оси ливня и параметром возраста ливня. В рассматриваемом диапазоне $r=(1+500)$ м. и $s=0.6+1,6$) изменение коэффициента может достигать 30% . Приводится физическое объяснение зависимости коэффициента переходного эффекта в

сцинтилляционным детекторе от расстояния до оси ливня.

С использованием полуаналитического метода Монте-Карло проведены расчеты ФПР полного потока энергии частиц ЭФК в атмосфере в диапазоне первичных энергий каскада $10+10^7$ ГэВ, возраста ливня $s=0.6+1.8$, радиальной переменной $r=(1+100)$ м. Результаты вычислений представлены в удобном для практического использования виде.

Представлен критический анализ имеющихся на сегодняшний день численных данных по полному потоку энергии ЭФК.

В заключении даются основные результаты работы:

1. Уровень флуктуаций в характеристиках черенковского света от ЭФК в атмосфере, регистрируемого гамма-телескопом сверхвысокой энергии, существенно зависит от размера приемного зеркала.

2. Как показал проведенный анализ на черенковских телескопах сверхвысокой энергии целесообразно использовать светоприемник с угловым полем обзора $\sim 3^\circ.5$ и угловым размером ФЭУ составляющим $\sim 0^\circ.25$. В целях повышения эффективности дискриминации на черенковском гамма-телескопе рекомендуется использовать несколько более жесткий мастерный критерий отбора, чем минимально допустимый с точки зрения надежного подавления свечения ночного неба.

3. Использование многомерного корреляционного анализа дает преимущество в достигаемых значениях эффективности дискриминации по сравнению с одномерным, а также многопараметрическим подходом с учетом корреляций.

4. На гамма-телескопе с большим зеркалом (например, телескоп FLWO) в рамках многомерного корреляционного анализа оказывается возможным достигать режекции фоновых ливней ПКЛ до $\leq 0.3+0.5\%$, сохраняя эффективность регистрации гамма-ливней 50%, что соответствует эффективности дискриминации $\alpha=7+8$.

5. Использование системы из 3-х, разнесенных на большое расстояние (~ 100 м) черенковских гамма-телескопов, имеющих зеркала малой площади (~ 5 м²), позволяет эффективно проводить дискриминацию фоновых ливней ПКЛ. Максимально достигаемое значение эффективности дискриминации ~ 8 , при режекции фона до $\sim 0.3\%$ и эффективности дискриминаций гамма-ливней $\sim 45\%$. Данный результат близок к значениям эффективности дискриминации, получаемым на одиночном гамма-телескопе большой площади.

6. На черенковских гамма-телескопах сверхвысокой энергии с многоканальными светоприемниками возможно измерение энергии гамма-квантов от локального

космического объекта на основе экспериментально измеряемых параметров черенковского образа ШАЛ. Погрешность измерения энергии для случая одиночного черенковского гамма-телескопа FLWO составляет $\sim 30+40\%$, для случая системы 3-х гамма-телескопов установки HEGRA $\sim 25+30\%$.

7.Использование методов измерения энергии, а также эффективных способов режекции фоновых ливней первичного космического излучения на черенковских гамма-телескопах с многоканальными светоприемниками обеспечивает возможность восстановления параметров энергетического спектра гамма-излучения локальных космических источников в диапазоне сверхвысокой энергии.

8.Точность восстановления параметров энергетического спектра излучения от локальных источников на том или ином гамма-телескопе определяется достигаемым уровне отношения "сигнал/флуктуаци фона. Так, для случая гамма-телескопа FLWO при $R=30$ относительно погрешности определения параметров энергетического спектра гамма-квантов составляют $\delta\gamma \sim 3\%$, $\delta A = \delta F_{\gamma} \sim 5+7\%$.

9.Численные данные, полученные полуаналитическим методом Монте-Карло, позволили уточнить функцию пространственного распределения полного потока электронов в электронно-Фотонном каскаде сверхвысокой и ультравысокой энергии в атмосфере по сравнению с имеющимися ранее аналитическими расчетами и численными данными.

10.На форму ФП электронов ШАЛ, регистрируемой в эксперименте, существенное влияние оказывают геометрический и переходный эффект в используемых детекторах частиц. Не учет влияния детектора приводит к существенным погрешностям в определении ФПР частиц ШАЛ до $\sim 50\%$, что может сказаться на результатах экспериментальных данных.

11.В рамках полуаналитического метода Монте-Карло получены новые численные данные по ФПР потока энергии частиц ЭФК ультравысокой энергии, развивающегося в атмосфере.

Результаты и выводы диссертации содержатся в следующих работах:

1. Конопелько А.К., Литвинов В.А., Пляшешников А.В., Учайкин В.В., Черняв Г.В. О флуктуациях в ШАЛ //Известия АН СССР, сер. Физ., 1986.- Т.50.- N11-с.2211-2213.
2. Konopelko A.K., Litvinov V.A., Plyasheshnikov A.V., Uchaikin V.V., Vetoshkin V.V., Vorobjev K.V. The lateral development of extremely high-energy electron-photon cascades in the atmosphere //Proc. of 20 ICRC, Moscow, 1987. -Vol.5 HE-р.395-398.
3. Пляшешников А.В., Конопелько А.К. Оценка эффективности методов дискриминации, используемых в γ - астрономии сверхвысокой энергии //Вопросы атомной науки и техники, серия: техника физ. эксперимента, 1988.- выпуск 4/39/- с.38-46.
4. Plysheshnikov A.V., Konopelko A.K., Vorobjev K.V. The ihree-dimensional development of high energy casades in the atmosphere //Preprint FIAN SSSR №92, 1988. -48 p.
5. Гончаров А.И., Конопелько А.К., Пляшешников А.В., Учайкин В.В. Влияние детектора на форму пространственного распределения частиц электромагнитного каскада в атмосфере //ИЗВЕСТИЯ АН СССР, сер. физ., 1989.- т.53 -№ 2 - с.329-331.
6. Plyasheshnikov A.V., Konopelko A.K., The determination of the VHE cosmic γ -radiation energy spectrum parametrs on the basis of gamma-ray telescope experimental data //Proc. of Int. Workshop on VHE gamma-ray astron., Crimea, USSR.1989.-p.115-119.
7. Plyasheshnikov A.V., Konopelko A.K, The energy estimation of VHE gamma-quanta by the gamma-ray telescope with the multi-channel receiver of the Cherenkov lighth //Proc. of Int. Workshop on VHE gamma-ray astron., Crimea, USSR, 1989. P.120-124
8. Aharonian F.A., Chilingarian A.A., Konopelko A.K., Piyasheshnikov A.V. On the possibility for a higher efficiency of discrimination of gamma-rays from point sourcen by the pattern recognition method //Preprint YERPHI 1171 (48)-89.- 20 p.
9. Plyasheshnikov A.V., Konopelko A.K. The dependence of thecosmic ray background discrimination effectiveness on the VHE gamma-ray telescope parameters //Proc. of 21 ICRC, Adelaide, 1990. - V.4.OG. -P.250-253.A

10. Aharonian F.A., Chilingarian A.A., Konopelko A.K., Plyasheshnikov A.V. On the possibility of an improvement of background hadronic showers discrimination against gamma-ray from a discrete source by a multidimensional Cherenkov light analysis// Proc. of 21 ICRC, Adelaide, 1990. - V. 4.0G. -P.246-249.
11. Агаронян Ф.А., Конопелько А.К., Пляшешников А.В., Чилингарян А.А. Анализ возможности подавления фона космических лучей при регистрации гамма-квантов сверхвысокой энергии с помощью системы черенковских гамма-телескопов с многоканальными светоприемниками//Препринт ЕФИ-1274(60)-90.-30с.