

На правах рукописи

Петков Валерий Борисович

**Исследование характеристик потоков частиц
космического излучения на установках
Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН**

01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
доктора физико–математических наук

МОСКВА – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,

ИЯИ РАН, зав. лабораторией

Р.А. Мухамедшин

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН,

ФГБУН Институт астрономии РАН, зам. директора

Д.В. Бисикало

доктор физико-математических наук,

НИИЯФ МГУ, зав. отделом

Л.А. Кузьмичев

Ведущая организация:

Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”

Защита диссертации состоится “ ” _____ 2013г. в _____ часов на заседании Диссертационного совета Д 002.119.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (г.Москва, проспект 60-летия Октября, 7а)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН

Автореферат разослан “ ” _____ 2013г.

Ученый секретарь Совета

кандидат физико-математических наук

Б.А.Тулупов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность проблемы.

В настоящее время бурно развивается область фундаментальных исследований, получившая название “космомикрофизика” (в англоязычной литературе - “Astroparticle Physics”). Данная область исследований охватывает поиск и всестороннее исследование фундаментальных физических явлений и закономерностей, реализующихся на микроскопических и космологических масштабах и в быстропротекающих астрофизических процессах. С экспериментальной точки зрения речь идет об одновременном изучении свойств элементарных частиц и астрофизических явлений в экспериментах, использующих потоки частиц природного происхождения (в том числе - потоки частиц космического излучения). Исследования в области космомикрофизики привели к необходимости создания больших комплексов экспериментальных установок, возможности которых позволяют решать широкий круг современных научных проблем. Одним из крупнейших центров, в котором проводятся исследования по данному направлению, является Баксанская нейтринная обсерватория Института ядерных исследований РАН (БНО ИЯИ РАН) расположенная на Северном Кавказе в долине реки Баксан. В БНО имеется уникальный комплекс экспериментальных установок, на которых в течение более чем тридцати лет проводятся исследования в указанной области фундаментальной физики. Программа исследований обсерватории постоянно расширялась по мере введения в строй новых наземных и подземных установок.

Данная работа посвящена экспериментальным исследованиям в области космомикрофизики по трём направлениям:

1) изучение спектра и состава первичного космического излучения (ПКИ) в широком диапазоне первичных энергий: $10^{13} - 10^{17}$ эВ, включающем область излома в спектре ПКИ;

- 2) поиск всплесков космического гамма-излучения в широком диапазоне энергий первичных гамма-квантов: 1 ГэВ - 100 ТэВ;
- 3) экспериментальный поиск испаряющихся первичных чёрных дыр (ПЧД).

Задача изучения излома в спектре космических лучей является ключевой для решения проблемы происхождения космических лучей. Измерения спектра и ядерного состава ПКИ до и после излома позволяют сделать выводы о возможных механизмах ускорения и распространения космических лучей сверхвысоких энергий.

Задача регистрации высокоэнергичного гамма-излучения в гамма-всплесках является одной из важнейших для решения проблемы их происхождения, поскольку измерения в этом диапазоне позволят наложить жесткие ограничения на физические условия в излучающей области.

Экспериментальное обнаружение ПЧД позволит получить ценную информацию о процессах, происходивших в ранней Вселенной, прежде всего о закономерностях инфляционного расширения и возникновения наблюдаемой ныне структуры. Необнаружение ПЧД (ограничение на концентрацию) при данном уровне экспериментальной техники также несет в себе полезную информацию, и позволяет продвинуться дальше в понимании ранней Вселенной.

Цели и задачи диссертации.

Основная цель работы – развитие современных методов измерения и исследования характеристик потоков частиц природного происхождения. Для этого были поставлены и решены следующие задачи:

1. Развитие экспериментальной базы исследований, в том числе создание ливневой установки “Андырчи” над Баксанским подземным сцинтилляционным телескопом;
2. Развитие и использование метода регистрации различных компонент ши-

роких атмосферных ливней космических лучей на комплексе установок БПСТ - “Андырчи”;

3. Разработка методов поиска всплесков космического гамма-излучения в широком диапазоне энергий первичных гамма-квантов (1 ГэВ - 100 ТэВ) на установках БНО;

4. Развитие методов экспериментального поиска испаряющихся первичных чёрных дыр.

Научная новизна.

В ходе выполнения работы были разработаны новые методы исследования потоков частиц природного происхождения и получены новые научные результаты.

1. Разработаны и созданы новые методические и аппаратные ресурсы для исследования потоков частиц природного происхождения.

2. По информации за чистое время набора 9.8 года (для 20 и более мюонов) получен спектр по числу мюонных траекторий в БПСТ. Полный диапазон измерений – от 1 до 250 траекторий – соответствует диапазону первичных энергий $10^{13} - 10^{16}$ эВ.

3. Разработан новый метод расчета спектра по числу мюонных траекторий в БПСТ, расчеты проведены для четырех моделей адронных взаимодействий. Показано, что для согласия расчетов с экспериментальными данными нужен более легкий состав с изломом при фиксированной энергии на заряд.

4. По данным установки “Андырчи” за чистое время набора 1501.2 суток измерен спектр мощностей ШАЛ в диапазоне $5.75 \leq \lg N_{r.p.} \leq 8.0$. Излом в спектре наблюдается при $\lg N_{r.p.} = 6.35$.

5. Разработан метод измерения зависимости среднего числа мюонов высокой энергии (пороговая энергия 230 ГэВ) от мощности ливня по совместным данным установок БПСТ и “Андырчи”. Экспериментальные данные получены за чистое время набора 1130.9 суток набора информации для диапазона $5.75 \leq \lg N_{r.p.} \leq$

7.6.

6. Разработан метод измерения средней функции пространственного распределения мюонов высокой энергии по совместным данным установок БПСТ и “Андырчи”. Измерения ФПР проведены в диапазоне мощностей ШАЛ $5.9 \leq \lg N_{r.p.} \leq 7.1$.

7. Для поиска всплесков космического гамма-излучения по данным установок БНО был разработан и применен метод поиска транзиентов интенсивности космического излучения в широком диапазоне энергий и длительностей. На установке БПСТ впервые проведен поиск высокоэнергичного гамма-излучения от гамма-всплесков по вторичным мюонам. На установке “Андырчи” проведен комплексный поиск гамма-всплесков по широким атмосферным ливням и одиночной компоненте.

8. По экспериментальным данным установки “Андырчи” за 1996 - 2006 годы (2290 суток чистого времени), набранным при работе установки в режиме регистрации одиночной компоненты космических лучей, получены ограничения на частоту гамма-всплесков высокой энергии и на потоки энергии, уносимые фотонами высокой энергии во всплесках, зарегистрированных на борту космических обсерваторий;

9. Разработаны методы и проведен поиск испаряющихся первичных чёрных дыр по экспериментальным данным установок “Андырчи” и “Ковёр-2”. Для трех моделей испарения получены новые верхние пределы на концентрацию испаряющихся первичных чёрных дыр в локальной области космического пространства характерного размера $\sim 10^{-3}$ пк.

Научная и практическая ценность.

Полученные методические разработки и научные результаты имеют высокую значимость при планировании и проведении работ в данной области исследований.

Полученный в работе спектр по числу мюонов в БПСТ является уникальной информацией, позволяющей сделать выводы о спектре и составе ПКИ диапазоне энергий $10^{13} - 10^{16}$ эВ. Рассматриваемый энергетический диапазон важен тем, что он перекрывается как с диапазоном прямых измерений в экспериментах на спутниках и баллонах, так и с диапазоном косвенных измерений по ШАЛ (10^{15} эВ и выше).

Полученная в работе зависимость среднего числа мюонов высокой энергии от мощности ШАЛ является важным вкладом в мировой банк данных о массовом составе первичного космического излучения в области излома.

Результаты работы используются при подготовке нового эксперимента ЕММА (Experiment with MultiMuon Array) по изучению состава ПКИ в области излома. В этом эксперименте, в составе группы ИЯИ РАН, принимает участие автор диссертации.

Практическую ценность для планирования новых экспериментов по поиску испаряющихся первичных чёрных дыр имеют выводы работы о необходимости учета временного профиля всплеска высокоэнергичного γ -излучения и мертвого времени установки.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Разработана и создана установка “Андырчи”, предназначенная для регистрации широких атмосферных ливней космических лучей. Расположение установки над Баксанским подземным сцинтилляционным телескопом позволяет одновременно регистрировать электронно-фотонную и высокоэнергичную мюонную компоненты ШАЛ. В процессе создания и наладки установки “Андырчи” решены такие методические задачи, как подавление послеимпульсов ФЭУ и защита установки от повреждений во время гроз.

2. Измерен спектр по числу мюонных траекторий в БПСТ в диапазоне от 1 до 250 траекторий, что соответствует диапазону первичных энергий $10^{13} - 10^{16}$

эВ. Разработан новый метод расчёта спектра по числу мюонных траекторий в БПСТ. Для согласия расчётов с экспериментальными данными предложен более лёгкий состав с изломом при фиксированной энергии на заряд.

3. Измерен спектр мощностей ШАЛ на установке “Андырчи” за чистое время набора 1501.2 суток в диапазоне мощностей $5.75 \leq \lg N_{r.p.} \leq 8.0$. Излом в спектре мощностей наблюдается при $\lg N_{r.p.} = 6.35$, что соответствует первичной энергии $\sim 4 \cdot 10^{15}$ эВ.

4. По методике совместной регистрации ШАЛ установками БПСТ и “Андырчи” за чистое время набора информации 1130.9 суток получены экспериментальные данные о характеристиках высокоэнергичной ($E_\mu > 230$ ГэВ) мюонной компоненты ШАЛ в области вокруг излома. Зависимость среднего числа мюонов в ШАЛ от мощности ливня измерена в диапазоне $5.75 \leq \lg N_{r.p.} \leq 7.6$. Средняя функция пространственного распределения измерена в диапазоне мощностей $5.9 \leq \lg N_{r.p.} \leq 7.1$.

5. Разработан метод изучения кратковременных изменений интенсивности космического излучения, который был применен для поиска всплесков космического гамма-излучения в диапазоне энергий 1 ГэВ - 100 ТэВ на установках БНО. Получены новые ограничения на частоту гамма-всплесков высокой энергии и потоки энергии, уносимых высокоэнергичными фотонами во всплесках, зарегистрированных на борту космических обсерваторий.

6. Разработаны методы и проведен поиск испаряющихся первичных чёрных дыр по экспериментальным данным установок “Андырчи” и “Ковер”. Для трех моделей испарения получены новые верхние пределы на концентрацию испаряющихся первичных чёрных дыр в локальной области космического пространства характерного размера $\sim 10^{-3}$ пк.

Апробация работы и публикации.

Результаты исследований, изложенные в диссертации, обсуждались на научных

семинарах ОЛВЭНА и БНО ИЯИ РАН, а также докладывались на многих российских и международных конференциях, в том числе:

Всероссийская конференция по космическим лучам (Алма-Ата 1988, Самарканд 1992, Москва 1994, Москва 1996, Москва 1998, Москва 2004, Москва 2006, Санкт-Петербург 2008, Москва 2010);

Международная конференция по космическим лучам, ICRC (Calgary 1993, Durban 1997, Hamburg 2001, Tsukuba 2003, Pune 2005, Merida 2007, Lodz 2009);

Международный симпозиум по взаимодействиям космических лучей высокой энергии ISVHECR (Weihai 2006, Paris 2008);

Европейский симпозиум по космическим лучам, ECRS (Perpignan 1996, Moscow 2002, Florence 2004, Lisbon 2006, Turku 2010);

Международная конференция Topics in Astroparticle and Underground Physics (Gran Sasso 2001, Zaragoza 2005);

Международная конференция по неускорительной новой физике NANP (Дубна 2001, 2003);

Международная школа “Частицы и космология” (Приэльбрусье, 1991, 1999, 2003);

Всероссийская астрономическая конференция, Нижний Архыз, 2010;

Всероссийская конференция “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра - 2010”, Москва, 2010;

Международная конференция по гамма-всплескам (Rome 2002, Annapolis 2010).

Основные результаты, полученные в диссертации, опубликованы в 47 работах. Их список приведён в Заключении.

Под научным руководством автора в рамках выполнения данной диссертационной работы выполнены и защищены 3 кандидатские диссертации.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из Введения, че-

тырёх частей, Заключение и списка литературы из 162 наименований. Работа включает 106 рисунков и 9 таблиц. Общий объём диссертации составляет 310 страниц.

Краткое содержание диссертации.

Во введении дается общая характеристика работы; формулируются цели исследования, обоснована актуальность исследований, её научная новизна, научная и практическая значимость, и перечислены основные направления работы.

Часть I, содержащая три главы, посвящена описанию установок для регистрации космических лучей Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. Баксанская нейтринная обсерватория Института ядерных исследований РАН (БНО ИЯИ РАН) расположена на Северном Кавказе в долине реки Баксан в точке с географическими координатами 43.28° с.ш. и 42.69° в.д. Научный комплекс БНО состоит из целого ряда крупных установок, созданных для решения фундаментальных задач, связанных с изучением как ядерных процессов, так и астрофизических явлений. В Обсерватории имеются три установки, предназначенные для регистрации различных компонент космических лучей: Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп (БПСТ), ливневая установка “Андырчи” и ливневая установка “Ковёр-2”. Установки расположены у подножья, на склоне или внутри горы Андырчи на высоте 1700 м над уровнем моря (центр установки “Андырчи” находится на высоте 2050 м). План расположения установок БПСТ, “Андырчи” и “Ковёр-2” изображен на рис. 1.

В первой главе части I приводится подробное описание установки БПСТ: конструкции (§1), стандартного детектора (§2), системы сбора информации (§3) и углового разрешения телескопа (§4). БПСТ находится в подземной выработке (камере) объёмом $24 \times 24 \times 16 \text{ м}^3$ под склоном горы Андырчи, на расстоянии 550

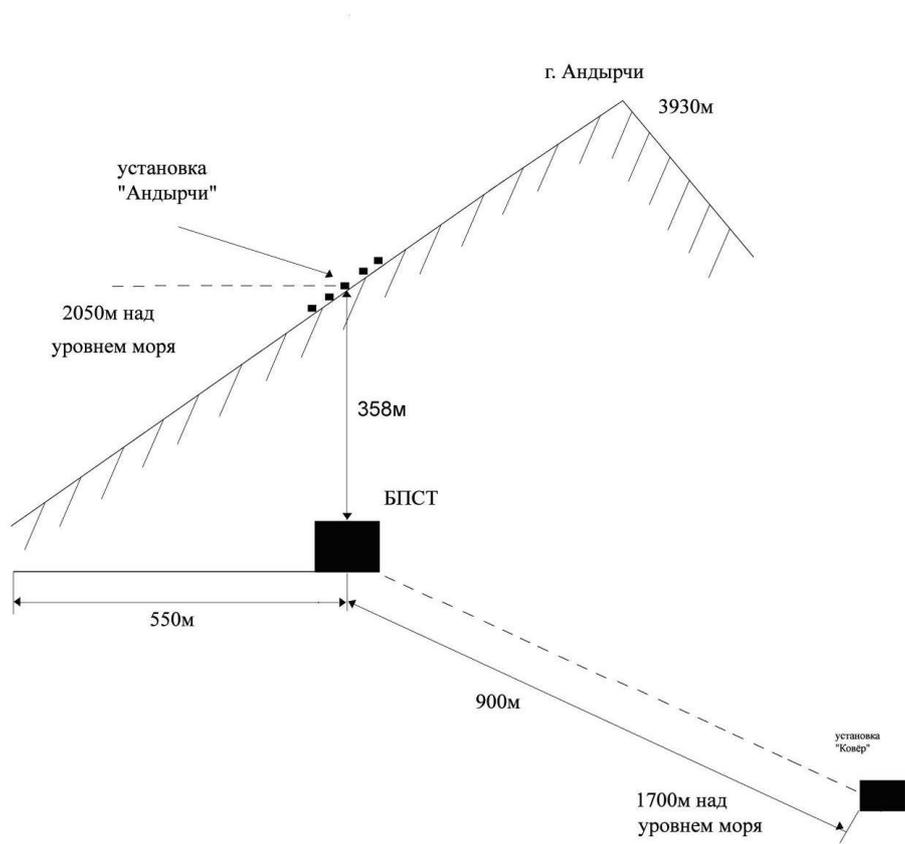


Рис. 1: План расположения установок БПСТ, “Андырчи” и “Ковёр”.

м от входа в штольню. Эффективная толщина грунта над телескопом равна 850 гг/см^2 (эффективная пороговая энергия 220 ГэВ). БПСТ представляет собой четырёхэтажное здание размером $16.7 \text{ м} \times 16.7 \text{ м} \times 11.1 \text{ м}$. Расстояние между этажами равно 3.6 м. Все шесть внешних и две внутренние плоскости телескопа сплошь покрыты стандартными сцинтилляционными детекторами. Полное число детекторов в телескопе 3180. Стандартный сцинтилляционный детектор представляет собой алюминиевый контейнер размерами $0.7 \text{ м} \times 0.7 \text{ м} \times 0.3 \text{ м}$, толщина алюминия 3 мм. Контейнер заполнен жидким сцинтиллятором на основе уайт-спирита. Детектор просматривается одним ФЭУ-49Б с диаметром фотокатода 150 мм. С начала 2001 г. запуск системы регистрации БПСТ происходит, когда что хотя бы в одном из детекторов установки энергосигнал превышает порог срабатывания импульсного усилителя-дискриминатора (8 МэВ). Привязка событий к мировому времени осуществляется следующим образом: для каждого события фиксируется время по часам БПСТ, ход которых, в свою очередь, контролируется с помощью GPS. Ячеистая структура и большие размеры БПСТ позволяют восстанавливать траектории регистрируемых мюонов и определять направления их прихода (θ, ϕ) , (т.е. зенитный θ и азимутальный ϕ углы в лабораторной системе координат). Угловое разрешение БПСТ определяется, в первую очередь, отношением размера счётчика к эффективной длине траектории мюона, которая обусловлена размерами и геометрией телескопа (и зависит от θ, ϕ). Оценка углового разрешения БПСТ была получена несколькими методами, давшими близкие результаты. Для области зенитных углов $\theta = 20^\circ - 80^\circ$ оно не хуже 1.8° .

Во второй главе части I подробно описана установка “Андырчи”. Приведено общее описание установки (§1), системы молниезащиты (§2), сцинтилляционного детектора (§3), РС-преобразователя (§4), подавителя послеимпульсов ФЭУ (§5), системы регистрации установки (§6), описаны методы определения угло-

вого разрешения установки и дана его оценка (§7), обсуждается энергетическая привязка и точность измерения энергосвыделения в детектора установки (§8). Установка “Андырчи” расположена на склоне горы Андырчи над БПСТ и состоит из 37 сцинтилляционных детекторов. Пластмассовый сцинтиллятор площадью 1 м^2 просматривается одним ФЭУ типа ФЭУ-49Б. Детекторы предназначены как для временных измерений (с целью определения направления прихода ШАЛ), так и для измерения энергосвыделения (с целью определения положения оси и полного числа частиц в ливне). Ливневой триггер вырабатывается при одновременном срабатывании ≥ 4 детекторов на установке, частота триггера $\sim 9 \text{ сек}^{-1}$. Расстояние между детекторами в горизонтальной плоскости $\approx 40 \text{ м}$. Центральный детектор установки расположен непосредственно над БПСТ, расстояние по вертикали составляет $\approx 350 \text{ м}$. Полная площадь установки $5 \cdot 10^4 \text{ м}^2$; телесный угол, под которым она видна из телескопа, 0.35 стерadians. Центр установки находится на высоте 2057 метров над уровнем моря, перепад высот между верхним и нижним рядами детекторов составляет $\approx 150 \text{ метров}$. В окрестности центральной части установки расположены два металлических контейнера размерами $6.0 \text{ м} \times 3.5 \text{ м} \times 2.5 \text{ м}$ каждый, в которых находится приемная регистрирующая аппаратура, on-line компьютер, стабилизированные источники электропитания. Электропитание установки осуществляется через силовую кабель от установки ПСТ. Компьютерная связь с ПСТ, а также синхронизация работы двух установок осуществляется через коаксиальные кабели длиной $\sim 1300 \text{ м}$. Максимальная длина линий связи между детекторами и регистрирующей аппаратурой $\sim 300 \text{ м}$. В связи с тем, что установка расположена в условиях высокогорья, её можно рассматривать как сложную металлическую конструкцию с произвольными поверхностными контактами с грунтом, находящуюся на теле гигантского грозоотвода, каковым является гора Андырчи. Такое расположение установки приводило в первые годы работы

к многочисленным повреждениям регистрирующей аппаратуры во время гроз. Для предотвращения подобных повреждений была разработана и внедрена система молниезащиты установки.

Детектор состоит из пластмассового сцинтиллятора размером $1000 \times 1000 \times 50$ мм³, светособирающего металлического кожуха-диффузора, имеющего форму усеченной 4-гранной пирамиды, в вершине которой находится кожух с ФЭУ-49Б. В кожухе ФЭУ находятся: делитель напряжений для ФЭУ, устройство для подавления послеимпульсов ФЭУ, высоковольтный преобразователь (27 В - 2 кВ); снаружи к нему прикреплена коробка с RC-преобразователем. Логарифмический RC-преобразователь предназначен для измерения энерговыделения в детекторе и для фиксации момента срабатывания детектора, необходимого для определения направления прихода ШАЛ по время-пролетной методике. Для обеспечения гидро- и термоизоляции каждый детектор помещён в защитный кожух из стали толщиной 1 мм. Детекторы оснащены системой термостабилизации, которая обеспечивает температуру детектора $\sim 25^\circ \text{C}$ с точностью поддержания в области сцинтиллятора $\pm 1.5^\circ \text{C}$, а в кожухе ФЭУ с точностью $\pm (0.1 - 0.2)^\circ \text{C}$.

Система регистрации установки “Андырчи” состоит из двух частей, находящихся: а) “верхняя” - в пункте регистрации на территории установки; б) “нижняя” - в аппаратном зале БПСТ. Верхняя часть системы регистрации обеспечивает набор информации по ливневой и вариационной задачам, а также контрольной информации с установки. Нижняя часть необходима для отбора ШАЛ, которые вызвали срабатывание как “Андырчи”, так и БПСТ. On-line компьютеры верхней и нижней частей связаны с помощью сети между собой и с файл-сервером. Вся информация с верхней и нижней частей установки каждые 15 минут поступает на диск файл-сервера. Синхронизация работы двух независимых установок - БПСТ и “Андырчи” - обеспечивается использованием для

временной привязки одних часов - часов БПСТ.

Для определения точности восстановления направления прихода ШАЛ установкой “Андырчи” были использованы три метода, которые дали близкие результаты: 1) моделирование событий с их последующей обработкой по тому же алгоритму, что и при обработке реальных событий; 2) направление прихода ливня независимо определяется по зарегистрированным БПСТ мюонам высокой энергии; 3) для каждого события направление прихода ШАЛ измеряется двумя частями установки, которые в этом случае рассматриваются как независимые, и измеряется угол между этими направлениями. Анализ полученных результатов показал, что угловое разрешение установки улучшается с ростом числа сработавших детекторов и для $\theta \leq 50^\circ$ не зависит от зенитного угла. Для событий, отобранных по ливневому триггеру ($N_d \geq 4$), угловое разрешение установки “Андырчи” составляет 3.8° . Энергетическая привязка в нашем эксперименте осуществляется к максимуму спектра энерговыделений в детекторе от одиночных частиц космических лучей, наиболее вероятное энерговыделение в сцинтилляторе (1 р.ч.) равно 10.5 МэВ. С целью уменьшения влияния возможных нестабильностей порога и коэффициента усиления ФЭУ на темп счета детектора пороги срабатывания всех детекторов были настроены на энерговыделение 0.54 р.ч., соответствующее положению минимума в спектре энерговыделений одиночного детектора, точность настройки порога не хуже 10%.

В третьей главе части I приведено необходимое для целей данной работы описание ливневой установки “Ковёр-2”: общее описание установки (§1), и система сбора информации эксперимента (§2). Установка “Ковёр-2” расположена на высоте 1700 м над уровнем моря, что соответствует глубине в атмосфере 840 г/см^2 . Центральная часть установки (собственно “Ковёр”) находится в здании под крышей толщиной 29 г/см^2 и состоит из 400 жидкостных сцинтилляцион-

ных детекторов (такого же типа, как и на БПСТ), расположенных в виде квадрата со стороной 14 м и покрывающих сплошную площадь 196 м^2 . В шести выносных пунктах (ВП) с тонкой крышей ($\sim 1.2 \text{ г/см}^2$) находятся 108 таких же детекторов, общая площадь ВП 54 м^2 . Мюонный детектор (МД) общей площадью 175 м^2 состоит из 175 детекторов такого же типа, как и применяемые на установке “Андырчи”. Детекторы расположены в подземном туннеле с толщиной поглотителя 500 г/см^2 , что соответствует пороговой энергии мюонов 1 ГэВ для вертикального направления. В данной работе использовалась информация, полученная на установке “Ковёр-2” в режиме регистрации одиночной компоненты космических лучей: каждую секунду измеряется темп счёта “Ковра”, ВП и МД.

Часть II, содержащая четыре главы, посвящена изучению спектра и состава первичного космического излучения в области энергий $10^{13} - 10^{17}$ эВ на установках БНО. В первой главе части II представлены результаты, полученные на БПСТ методом изучения групп мюонов. На Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе исследования характеристик групп мюонов были начаты ещё в конце 1970-х годов под руководством А.Е. Чудакова. Изучение групп мюонов в подземных экспериментах позволяет получить информацию о спектре и составе первичного космического излучения в диапазоне энергий $10^{13} - 10^{16}$ эВ. Рассматриваемый энергетический диапазон интересен тем, что он перекрывается как с диапазоном прямых измерений в экспериментах на спутниках и баллонах, так и с диапазоном косвенных измерений по ШАЛ (10^{15} эВ и выше). В §1 приведены результаты измерения спектра групп по числу мюонных траекторий в БПСТ (спектра кратностей). Исходной информацией для определения характеристик мюонных групп являются координаты сработавших детекторов. При обработке событий определяется число пересекающих телескоп мюонных

траекторий m , и направление прихода группы (т.е. зенитный θ и азимутальный ϕ углы). Для целей данной работы были созданы два архива первично обработанной информации БПСТ. Первый архив содержит информацию о мюонных группах, собранную за период с 65 дня 2001 года по конец 2004 года (1227 суток набора). Так как с 65 дня 2001 года в исходном архиве БПСТ сохраняется вся информация о любом событии в телескопе (начиная с одного сработавшего детектора), этот архив используется для построения начального участка спектра групп по числу мюонов в телескопе (от 1 и выше). В обработке использовались события, отобранные по условию срабатывания детекторов не менее чем на трех плоскостях БПСТ, при этом обязательно должна сработать какая-либо из внутренних плоскостей. Частота таких событий составляет 7.45 сек^{-1} . Для каждого события в архив записывается его абсолютное время (с точностью до 0.2 мс), направление прихода группы мюонов (углы θ , ϕ) и число мюонных траекторий m . Чистое время набора составляет $1.03 \cdot 10^8$ секунд (≈ 3.3 года), полное число событий $7.75 \cdot 10^8$. Вторым архивом была информация БПСТ за 1984 г. - 1995 г. (чистое время ≈ 9.8 года). Отбирались события, когда в телескопе сработало 100 и более детекторов, что соответствует прохождению через телескоп 20 и более мюонов для направлений, близких к вертикали. Этот архив содержит как исходную информацию о событии, так и восстановленные параметры мюонных групп для $\approx 10^5$ событий. Поскольку эффективность восстановления с помощью программы обработки падает с ростом числа сработавших детекторов, была проведена переобработка всех событий с числом сработавших в ПСТ детекторов 200 и более (≈ 69000 событий) с помощью программы визуализации. Полученный в результате обработки архивной информации интегральный спектр по числу мюонов в ПСТ для зенитных углов $\theta \leq 20^\circ$ представлен на рис. 2.

В §2 описан метод расчёта спектра кратностей. Используемый в данной ра-

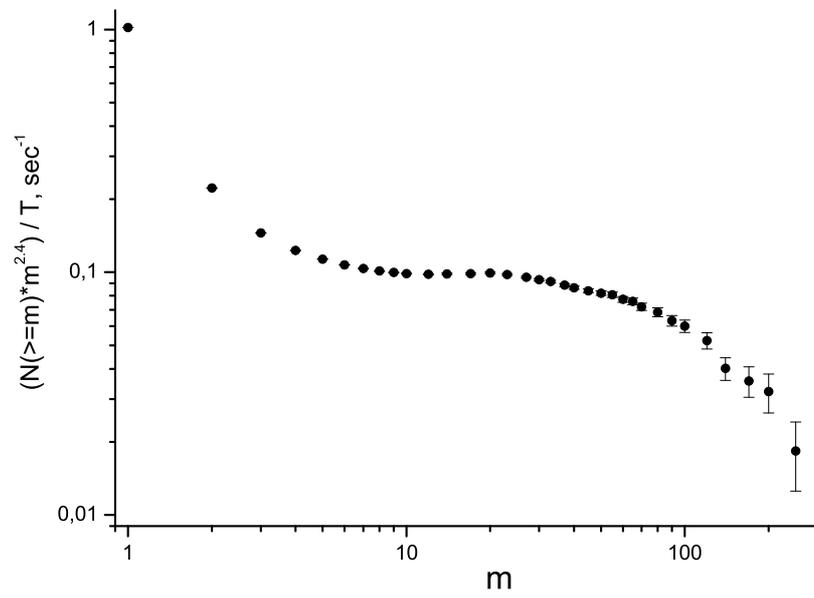


Рис. 2: Интегральный спектр по числу мюонных траекторий в ПСТ для $\theta \leq 20^\circ$.

боте метод численного расчёта спектра по числу мюонов (спектра кратностей) в телескопе опирается на метод аналитического расчета, предложенный А.Е. Чудаковым и используемый в наших ранних работах. Отличие заключается в возможности учёта зависимости ФПР мюонов от первичной энергии и в возможности использования произвольной функции распределения по числу мюонов в ШАЛ.

В §3 приведены результаты расчёта характеристик высокоэнергичной мюонной компоненты ШАЛ. Для расчёта спектра кратностей, кроме модели первичного состава, необходимы такие характеристики высокоэнергичной мюонной компоненты ШАЛ, как зависимость среднего числа мюонов от энергии на нуклон, функция распределения по числу мюонов (флуктуации множественности) и функция пространственного распределения мюонов в ШАЛ. В данной работе использовались характеристики, полученные с помощью программы CORSIKA для четырех моделей адронных взаимодействий (QGSJet 01, QGSJet II, EPOS 1.99 и SIBYLL 2.1).

В §4 представлены оценки массового состава ПКИ по данным БПСТ. В качестве примера на рис.3 приведено сравнение экспериментальных результатов с расчётом для т.н. лёгкого состава ПКИ, в расчёте были использованы характеристики мюонной компоненты ШАЛ с пороговой энергией 230 ГэВ, полученные для модели QGSJET 01. Сравнение результатов расчетов для различных моделей первичного спектра с экспериментом показали, что спектр ПКИ без излома не может объяснить наши экспериментальные данные.

В §5 приведены результаты расчётов спектра групп по числу мюонных траекторий и оценки состава ПКИ для различных моделей адронных взаимодействий. Т.к. характеристики высокоэнергичной мюонной компоненты ШАЛ для рассматриваемых четырех моделей адронных взаимодействий слабо отличаются, расчётные спектры групп по числу мюонных траекторий в БПСТ для этих мо-

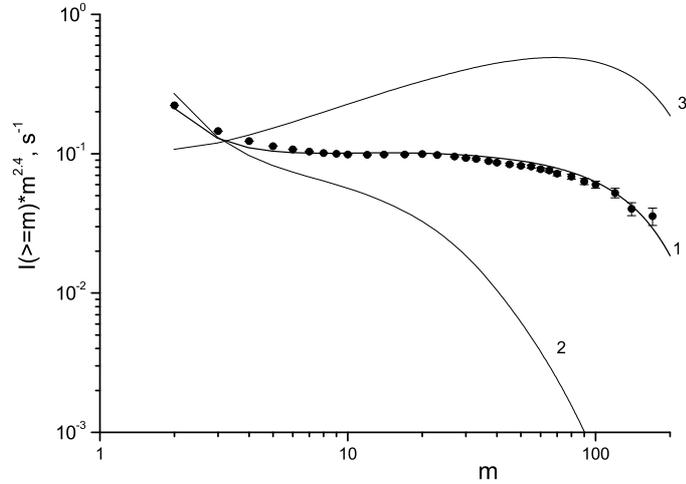


Рис. 3: Спектр групп по числу мюонных траекторий в БПСТ ($\theta \leq 20^\circ$, $E_\mu \geq 230$ ГэВ). Точки - эксперимент. Расчет: 1 - лёгкий состав ПКИ, излом при $E_{kz} = Z \times 2.0 \cdot 10^{15}$ эВ; 2 - чисто протонный состав, $\gamma_p = 2.76$, 3 - чисто железный состав, $\gamma_{Fe} = 2.68$.

делей также слабо различаются между собой для одного и того же первичного состава. В (§6) описан метод изучения флуктуаций множественности в группах мюонов.

Во второй главе части II представлены результаты измерения спектра мощностей ШАЛ на установке “Андырчи”. Исторически мощность (размер) ливня N_e определяют как полное число заряженных частиц (основную часть которых составляют e^\pm) на уровне наблюдения. Такое определение возникло в то время, когда измерения параметров ШАЛ проводились с помощью детекторов, собранных из газоразрядных счётчиков (обычно счётчиков Гейгера). Использование в ливневых экспериментах сцинтиляционных детекторов (которые измеряют энерговыделение от всех прошедших через сцинтиллятор заряженных частиц) привело к необходимости развивать методы пересчета от энерговыделения в детекторе к числу приходящих на детектор заряженных частиц.

В нашем эксперименте для реконструкции характеристик ШАЛ используются показания сцинтилляционных детекторов в единицах наиболее вероятного энерговыделения (р.ч.). И в дальнейшем анализе используется как размер ливня N_e , так и непосредственно мощность ШАЛ $N_{r.p.}$ в единицах р.ч. В последнем случае расчёты параметров ШАЛ также проводились в единицах р.ч., для этого характеристики всех дошедших до уровня установки “Андырчи” частиц (полученные по программе CORSIKA) поступали на вход программы расчета отклика детекторов установки, в которой вычислялось энерговыделение в детекторах.

В §1 описана методика восстановления мощности ливня по данным установки “Андырчи”. Процедура восстановления параметров ливня проводится в плоскости, перпендикулярной направлению прихода ШАЛ, после восстановления углов прихода ШАЛ θ, ϕ . В качестве функции пространственного распределения используется НКГ-функция с Мольеровским радиусом $r_0 = 96$ м, которая хорошо описывает наши экспериментальные данные. Для восстановления параметров ливня (положение оси ШАЛ x_0, y_0 , параметр s функции пространственного распределения, мощность ливня $N_{r.p.}$) используется метод максимального правдоподобия, с нормальной функцией распределения для логарифма энерговыделения в детекторе. Рассмотрим ливни, удовлетворяющие следующим условиям: 1) $\sec \theta \leq 1.05$, т.е. взяты околоразвертикальные события; 2) число сработавших детекторов ≥ 22 ; 3) 4-е сработавших детектора с максимальным энерговыделением (при этом энерговыделение в каждом детекторе должно быть не менее 10 р.ч.) находятся внутри установки, т.е. не в периметре; 4) реконструированное положение оси находится в центральной части установки (внутри круга радиусом 50 м). Для таких ливней спектр мощностей ШАЛ может быть восстановлен без искажений в диапазоне $5.75 \leq \lg N_{r.p.} \leq 8.0$, реконструированный спектр в сравнении с исходным (смоделированным) приведен на рисунке 4.

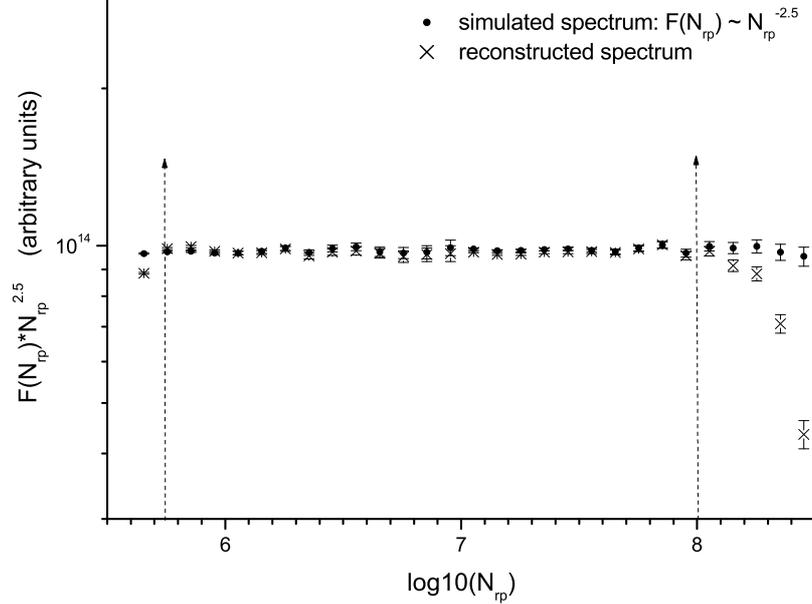


Рис. 4: Смоделированный и восстановленный спектры мощностей ШАЛ

В §2 анализируется полученный по данным установки спектр мощностей ШАЛ в области излома. На рисунке 5 приведен спектр мощностей ШАЛ для околовертикальных событий, полученный по данным установки “Андырчи” за чистое время набора информации 1501.2 суток (≈ 4.1 года). Излом в спектре находится при $\lg N_{r.p.} \approx 6.35$. На этом же рисунке приведены результаты расчетов для двух составов ПКИ, стандартного и лёгкого. Как видно из рисунка, для стандартного состава имеется небольшое расхождение с экспериментальными данными в области после излома (это расхождение устраняется незначительным изменением состава). Следует заметить, что лёгкие составы ПКИ, согласующиеся со спектром кратностей в БПСТ, полностью противоречат измеренному на установке “Андырчи” спектру мощностей ШАЛ.

В третьей главе части II представлены результаты измерения характеристик высокоэнергичной мюонной компоненты ШАЛ в области излома. Эти из-

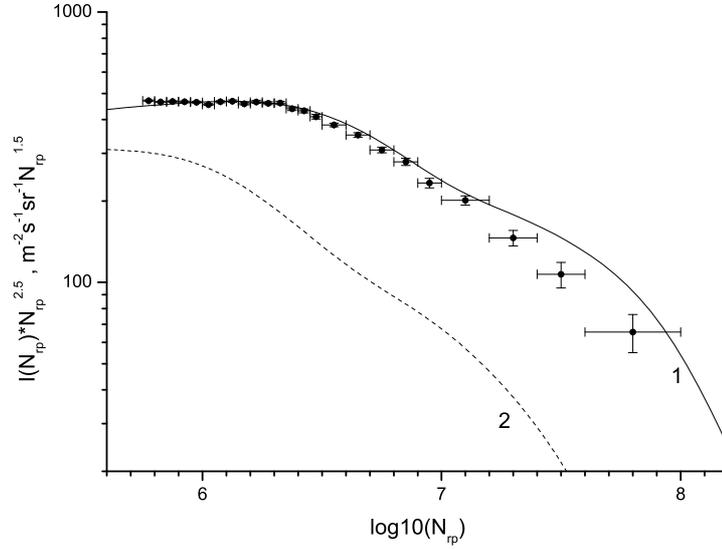


Рис. 5: Спектр мощностей ШАЛ. Точки - эксперимент. Сплошная линия 1 - расчёт для стандартного состава ПКИ. Штриховая линия 2 - расчёт для лёгкого состава ПКИ.

мерения проведены по методике совместной регистрации ШАЛ установками БПСТ и “Андырчи” за чистое время набора информации 1130.9 суток. В §1 описывается методика и приводятся результаты измерения зависимости среднего числа мюонов в ШАЛ от мощности ливня. Так как в каждом отдельном ливне БПСТ регистрирует только часть от полного числа мюонов, в нашем эксперименте можно измерить лишь среднее число мюонов \bar{N}_μ для всей совокупности с данным $N_{r.p.}$. Для этого используется метод построения среднего ливня для данного диапазона по $N_{r.p.}$.

На рисунке 6 приведена зависимость среднего числа высокоэнергичных мюонов в ШАЛ от $N_{r.p.}$. Расчёт $\bar{N}_\mu(N_{r.p.})$ был проведен с учетом энергетических спектров первичных ядер и зависимости между $N_{r.p.}$ и числом мюонов высокой энергии N_μ в ШАЛ с заданной первичной энергией (между $N_{r.p.}$, фактически полным числом частиц в ливне, и числом мюонов высокой энергии N_μ

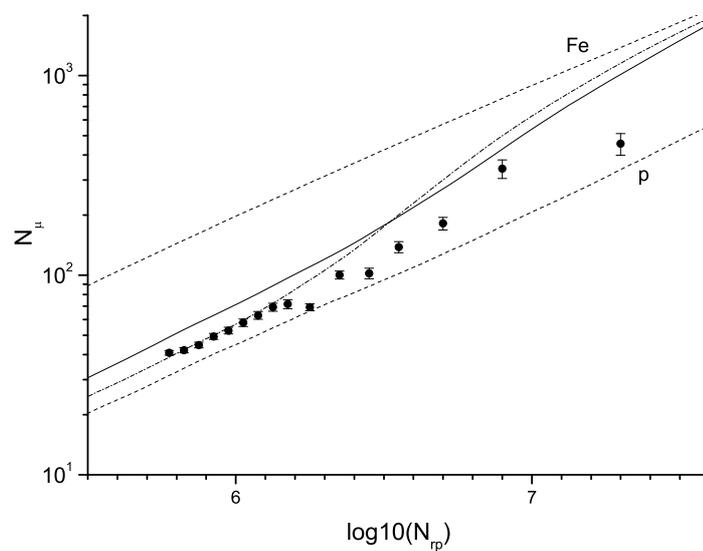


Рис. 6: Зависимость среднего числа мюонов в ШАЛ от мощности ливня. Точки - эксперимент. Сплошная линия - расчёт для близкого к стандартному составу ПКИ. Штрих-пунктирная линия - расчёт для легкого состава ПКИ (модель QGSJet II). Штриховые линии - расчёт для первичных протонов и ядер железа.

для ШАЛ с фиксированной первичной энергией существует антикорреляция). Расчётные зависимости $\bar{N}_\mu(N_{r.p.})$ для четырёх первичных составов приведены на рис. 6. Как видно, во всем диапазоне $N_{r.p.}$ ни один из рассматриваемых составов ПКИ не согласуется с экспериментальными данными, но в области до излома один из вариантов легкого состава ПКИ не противоречит эксперименту.

В §2 рассматриваются результаты измерения пространственного распределения мюонов высокой энергии в ШАЛ. Поскольку подземный телескоп измеряет лишь небольшую часть от полного числа мюонов в каждом ливне и погрешность в определении положения оси ШАЛ на уровне БПСТ сравнима с размерами телескопа, прямое измерение ФПР мюонов в нашем эксперименте невозможно. Поэтому для получения ФПР для всей совокупности ливней с данным N_e измеряется доля мюонов в телескопе $\Delta(R)$ как функция расстояния R между центром БПСТ и осью ШАЛ. Доля мюонов в телескопе $\Delta(R)$ зависит только от ФПР мюонов $f(r)$ и геометрии установки. Для расстояний, много больших, чем характерный размер установки ($R \gg \sqrt{S_t}$), доля мюонов в телескопе $\Delta(R) \approx S_t \cdot f(R)$. В дальнейшем анализе экспериментальных данных использовалась та же ФПР мюонов, которая использовалась для анализа спектра кратностей в БПСТ. Для определения параметра r_0 измеренные в каждом из диапазонов по N_e зависимости доли мюонов от расстояния сравнивались с вычисленными для ряда значений параметра r_0 функциями $\Delta(R)$. Расчет $\Delta(R)$ был проведен методом Монте-Карло, в нем учитывалась погрешность в определении положения оси ливня, которая на уровне БПСТ составляет $\sigma_R \approx 12$ м (основной вклад в нее, вследствие большого расстояния между установками, дает погрешность в определении направления прихода ШАЛ). На рис. 7 приведены измеренная в эксперименте зависимость $\Delta(R)$ для диапазона $5.9 \leq \lg N_e < 6.3$ и ожидаемая при значении параметра $r_0 = 4.6$ м (дает наилучший фит для этого диапазона). Для сравнения там же приведена

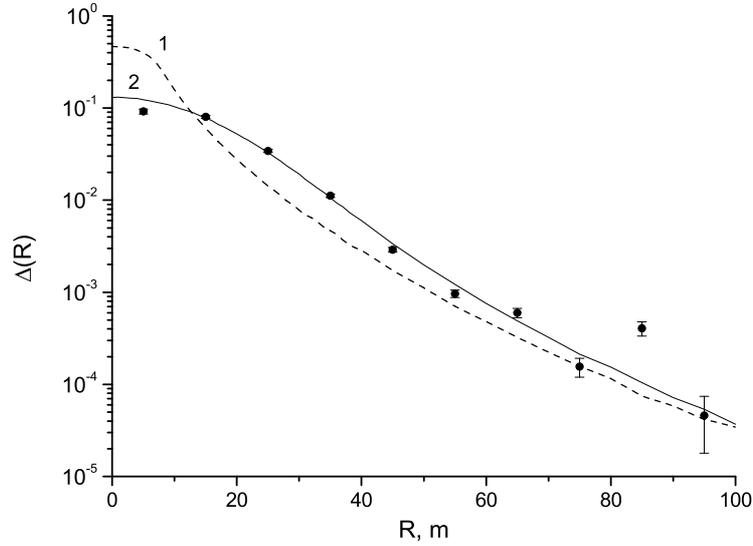


Рис. 7: Доля мюонов в телескопе как функция расстояния от оси ШАЛ до центра БПСТ для ШАЛ с $5.9 \leq \lg N_e < 6.3$. Точки - эксперимент, линии - расчёт для ФПР с $r_0 = 4.6$ м. 1: $\sigma_R = 0$ м; 2: $\sigma_R = 12$ м.

зависимость при $\sigma_R = 0$ м, т.е. при отсутствии погрешности в определении положения оси ШАЛ. Полученные для каждого из рассматриваемых диапазонов по N_e значение параметра r_0 незначительно различаются между собой: для $\lg \bar{N}_e = 6.1$ $r_0 = 4.6 \pm 0.5$ м, для $\lg \bar{N}_e = 6.4$ $r_0 = 4.0 \pm 0.8$ м и для $\lg \bar{N}_e = 6.7$ $r_0 = 3.9 \pm 0.5$ м. Т.о., используемый метод измерения ФПР, из-за больших погрешностей в определении r_0 , не позволяют сделать вывод о составе ПКИ в рассматриваемом диапазоне по N_e .

В четвёртой главе части II проведён совместный анализ полученных экспериментальных данных. Как видно из предыдущего, анализ трех видов полученных в нашем эксперименте данных (спектр кратностей в БПСТ, спектр мощностей ШАЛ и зависимость среднего числа мюонов высокой энергии от мощности ливня) приводит к различным предсказаниям для спектра и состава ПКИ, но с утяжелением состава после излома для всех моделей ПКИ. Объяснить пол-

ный набор наших экспериментальных данных в рамках одной модели ПКИ можно, если изменить (настроить) соответствующим образом характеристики ШАЛ, полученные первоначально моделированием (в нашем случае - с помощью программы CORSIKA) развития ливня в атмосфере Земли. Достаточно изменить одну из двух характеристик: функцию рождения мюонов (ФРМ), т.е. зависимость от энергии первичной частицы на нуклон среднего числа (также на нуклон) высокоэнергичных мюонов в ШАЛ; или зависимость мощности ливня от энергии первичной частицы. В первом случае (модифицированная ФРМ) все три типа экспериментальных данных можно объяснить составом ПКИ, близким к стандартному; во втором случае (модифицированная зависимость $\bar{N}_{rp}(E_0)$) – вариантом лёгкого состава ПКИ.

Часть III, содержащая три главы, посвящена экспериментальному поиску вспышек космического гамма-излучения на установках БНО. Вспышки космического гамма-излучения различной природы могут регистрироваться наземными установками в широком диапазоне энергий первичных гамма-квантов. На установках БНО проведен поиск космических гамма-всплесков в широком диапазоне энергий ($E_\gamma \sim 1$ ГэВ – 100 ТэВ) и длительностей. Для этого были разработаны методы поиска транзиентов интенсивности космического излучения. В диапазоне низких энергий, $E_\gamma \gtrsim 1$ Гэв, поиск проводился по данным установок “Андырчи” и Ковёр-2, полученным в режиме регистрации одиночной компоненты космических лучей. Для поиска вспышек с энергией первичных фотонов $E_\gamma \gtrsim 0.5$ Тэв использовались данные БПСТ. По данным о ШАЛ, зарегистрированных установкой “Андырчи”, проведен поиск вспышек с энергией первичных фотонов $E_\gamma \gtrsim 60$ Тэв. В общем случае, вследствие относительно плавной зависимости вероятности регистрации первичных гамма-квантов от их энергии, нельзя однозначно определить энергию первичных гамма-квантов для

заданных условий отбора событий. Можно говорить лишь о диапазоне чувствительности установки, который зависит от вида энергетического спектра первичных гамма-квантов и направления их прихода (зенитного угла). В качестве эффективной энергии регистрируемых установкой γ -квантов будем использовать их медианную энергию.

В первой главе части III рассмотрен отклик установок БНО на первичные гамма-кванты: низкой энергии, при работе наземных установок в режиме регистрации одиночной компоненты космических лучей (§1); отклик БПСТ, при регистрации мюонов высокой энергии от первичных гамма-квантов (§2); отклик установки “Андырчи”, при регистрации ШАЛ от первичных гамма-квантов с $E_\gamma \gtrsim 60$ Тэв (§3). Рассмотрим в качестве примера отклик установки “Андырчи” для режима регистрации одиночной компоненты. Функцию отклика при учёте поглощения первичных фотонов при взаимодействии с оптическим и инфракрасным межгалактическим диффузным фоном можно представить в следующем виде:

$$R(E, \theta, z) = P(E, \theta) \times I(E) \times \exp(-\tau(E, z)), \quad (1)$$

где $\tau(E, z)$ - оптическая толщина для γ -лучей с энергией E , проходящих от источника с красным смещением z . Вероятности регистрации $P(E, \theta)$ вторичных частиц, рожденных первичными γ -квантами с энергией E и падающих на установку бесконечной площади под зенитным углом θ , были получены посредством моделирования электромагнитных каскадов в атмосфере и детекторе установки. γ -квантов $I(E) \sim E^\gamma$ - энергетический спектр первичных (в источнике) фотонов. На рисунке 8 для вертикального направления приведены функции отклика для степенного спектра с показателем степени -2.0 , при нескольких значениях z .

Зависимости медианой энергии регистрируемых установкой “Андырчи” γ -квантов от зенитного угла для различных z приведены на рис. 9. Как и следо-

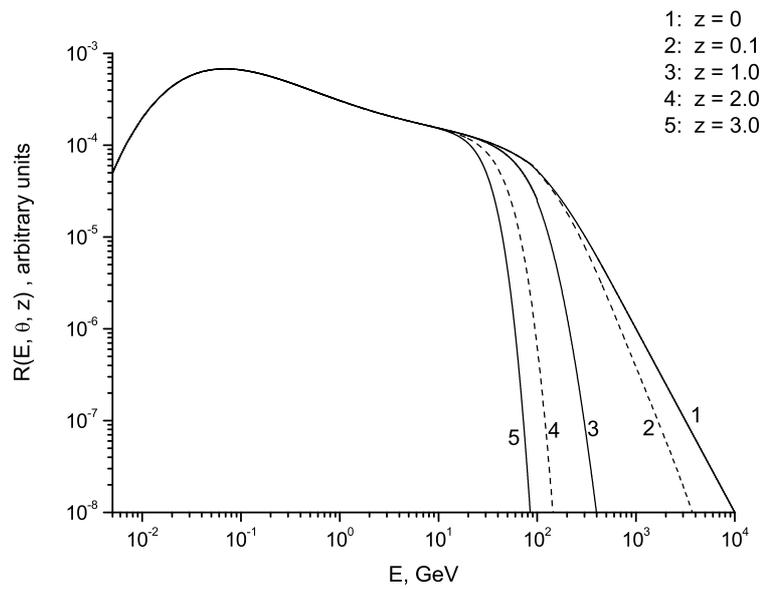


Рис. 8: Функции отклика установки “Андырчи” для вертикального направления ($\theta = 0^\circ$) при различных значениях красного смещения z . Энергетический спектр первичных (в источнике) γ -квантов - степенной с показателем степени -2.0 .

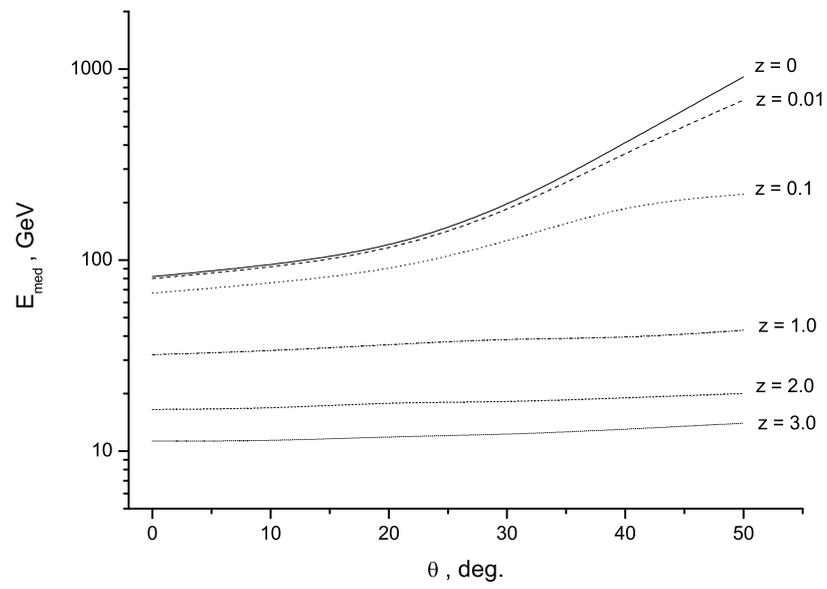


Рис. 9: Зависимость от зенитного угла медианной энергии регистрируемых установкой “Андырчи” γ -квантов для различных значений красного смещения z . Энергетический спектр первичных (в источнике) γ -квантов - степенной с показателем степени -2.0 .

вало ожидать, эффект увеличения медианной энергии с ростом зенитного угла становится менее выраженным при больших значениях z , что является следствием более раннего обрезания по энергии для больших значений красного смещения.

Во второй главе части III приведены результаты поиска космических γ -всплесков с $E_\gamma \gtrsim 1$ ГэВ по данным установки “Андырчи”. Космические гамма-всплески (КГВ) с энергией фотонов больше нескольких ГэВ могут быть зарегистрированы наземными установками большой площади, расположенными на высоте гор и работающими в режиме регистрации одиночной компоненты космических лучей. Это означает, что в подобном эксперименте измеряется суммарный темп счёта всех детекторов установки. Направление прихода частиц при работе установок в таком режиме не определяется, эффективная энергия первичных гамма-квантов зависит от высоты расположения установки над уровнем моря (в основном) и от типа используемых детекторов. В такого рода экспериментах гамма-всплески должны проявить себя как кратковременное увеличение темпа счёта. Поиск КГВ по данной методике проводится в условиях большого фона космических лучей, что требует высокой стабильности и надежности работы установок.

В §1 описана методика поиска отклонений в темпе счёта установки и приведены ограничения на частоту гамма-всплесков высокой энергии. Для поиска отклонений в темпе счёта установки “Андырчи” используется параметр F_i , который представляет собой отклонение в единицах Пуассоновской сигмы числа отсчётов за i -ю секунду 15-и минутного интервала от среднего за интервал. Поскольку вариациями интенсивности космических лучей за 15 минут в первом приближении можно пренебречь и средний темп счёта достаточно велик, можно ожидать, что параметр F_i подчиняется нормальному распределению со средним значением $V = 0$ и среднеквадратичным отклонением $\sigma = 1.0$. Анализ от-

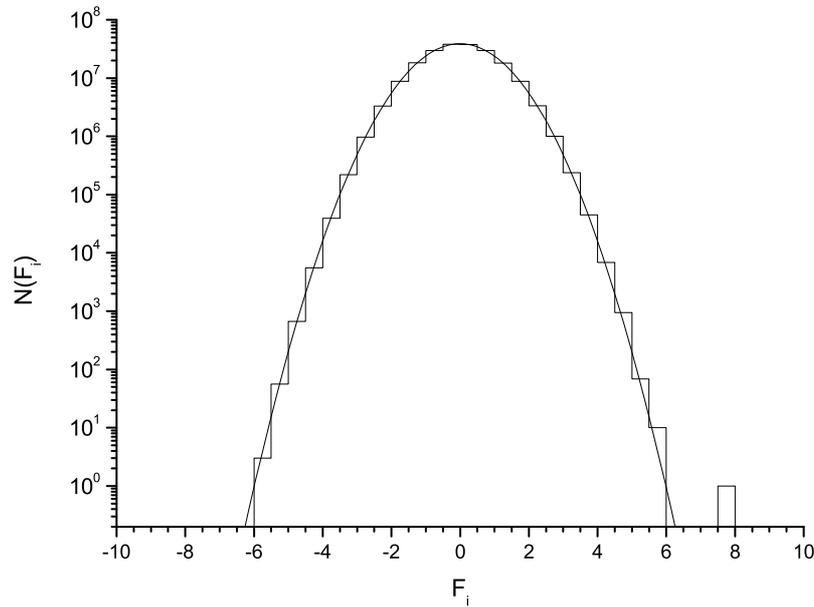


Рис. 10: Экспериментальное распределение по параметру F_i для установки “Андырчи”; линия - фит распределением Гаусса со средним значением $V = -(0.0025 \pm 0.0004)$ и среднеквадратичным отклонением $\sigma = 1.01$.

клонений в темпе счёта между частями установки дает возможность исключить точки с неразумно большими отклонениями в темпе счёта между частями установки, т.е. частично исключить аппаратные погрешности. Полезные события (секундные точки) могут быть отброшены с вероятностью $2 \cdot 10^{-9}$ для всех событий и с вероятностью $1.3 \cdot 10^{-3}$ для событий с $F_i \geq 5$. Из всего объема экспериментальных данных по этому условию было отброшено $\sim 0.01\%$ событий. На рисунке 10 приведено экспериментальное распределение по параметру F_i за время набора информации с 79 дня 1996 года по 68 день 2006 года (2290.1 суток чистого времени). Экспериментальные данные хорошо фитируются до $\sim 6\sigma$ нормальным распределением со средним значением $V = -(0.0025 \pm 0.0004)$ и среднеквадратичным отклонением $\sigma = 1.01$. Единственное событие с большим превышением в темпе счёта “Андырчи” (7.9σ) произошло 17 апреля 2002 г. в

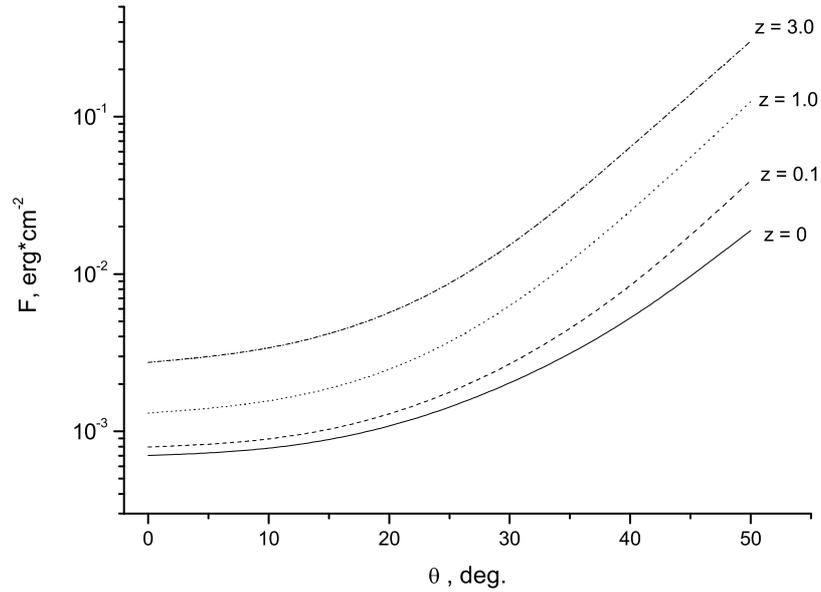


Рис. 11: Зависимость потоков энергии в диапазоне 1 ГэВ - 100 ГэВ от зенитного угла для степенного спектра с показателем степени -2.0 при $F_i = 6$.

17:31:29 UT, КГВ на космических аппаратах в этот момент не были зарегистрированы. Обнаруженное в нашем эксперименте событие вызвано, скорее всего, синхронной электромагнитной помехой. Дело в том, что на работавших в это время выносных пунктах установки “Ковёр-2” не было обнаружено значимых превышений в темпе счета. Расстояние между установками в горизонтальной плоскости ~ 1 км, т.е., они просматривают один и тот же участок небесной сферы, а вероятности регистрации событий от первичных γ -квантов для выносных пунктов и “Андырчи” примерно одинаковы.

Отсутствие больших превышений над средним темпом счета может быть интерпретировано, как отсутствие гамма-всплесков длительности $\Delta t \leq 1$ сек с соответствующим потоком энергии, которые вычисляются в одном диапазоне энергий первичных γ -квантов для различных z и зенитных углов: $E_{\min} = 1$ ГэВ и $E_{\max} = 100$ ГэВ. Потоки энергии для $F_i = 6$ при степенном спектре с

показателем степени $\gamma = -2.0$, приведены на рис. 11 в зависимости от зенитного угла. Ограничение на частоту таких событий составляет 0.73 год^{-1} на 99% доверительном уровне.

В §2 приведены результаты поиска гамма-излучения высокой энергии в КГВ, зарегистрированных на борту космических обсерваторий. Для поиска γ -излучения высокой энергии в зарегистрированных на борту космических обсерваторий КГВ были отобраны события, попавшие в поле зрения установки (которые были видны с установки под зенитным углом $\theta \leq 50^\circ$). За период наблюдения (1996 по 2006 годы) в поле зрения установки попало 189 КГВ, для которых есть информация о темпе счета установки во временном промежутке от -650 до +900 секунд относительно начала КГВ. Из них 160 длительных ($T_{90} > 2 \text{ с}$) и 29 коротких ($T_{90} \leq 2 \text{ с}$). Рассмотрим поиск прямого излучения в индивидуальных событиях. Для каждого КГВ была получена соответствующая кривая блеска, которая представляет собой полный темп счёта установки (в рассматриваемом временном интервале относительно начала всплеска) после вычета фона. Фон определяется из двух интервалов длительностью 600 с, до и после интервала длительностью 350 с (от -50 с до +300 с относительно начала КГВ), в котором проводится поиск сигнал. Вследствие достаточно крутого спектра первичных космических лучей, фон представляет собой поток вторичных частиц, рожденных первичными частицами (в основном, протонами) с энергией $\sim 10 - 100 \text{ ГэВ}$. Была использована линейная модель фона, т.к. поток вторичных космических лучей модулируется с характерным временем порядка нескольких часов. Сумма числа отсчётов в интервале T_{90} была получена для кривой блеска каждого события, значимость этой величины была определена стандартным способом по двум фоновым интервалам. Значимых отклонений от фона не было обнаружено, в целом распределения отклонений согласуются с ожидаемым от флуктуаций фона космических лучей (рис. 12). Затем для каж-

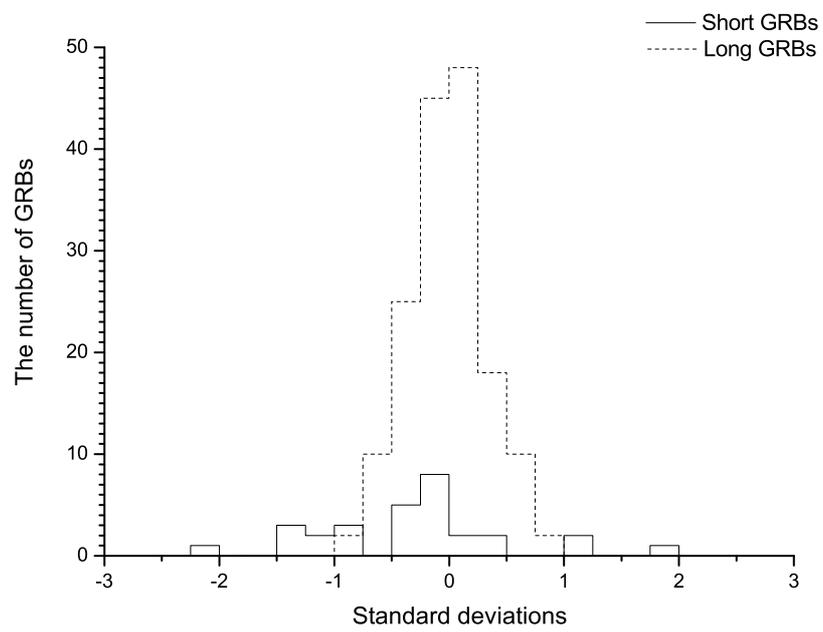


Рис. 12: Распределение отклонений от фона (в единицах стандартного отклонения) для 29 коротких и 169 длительных КГВ.

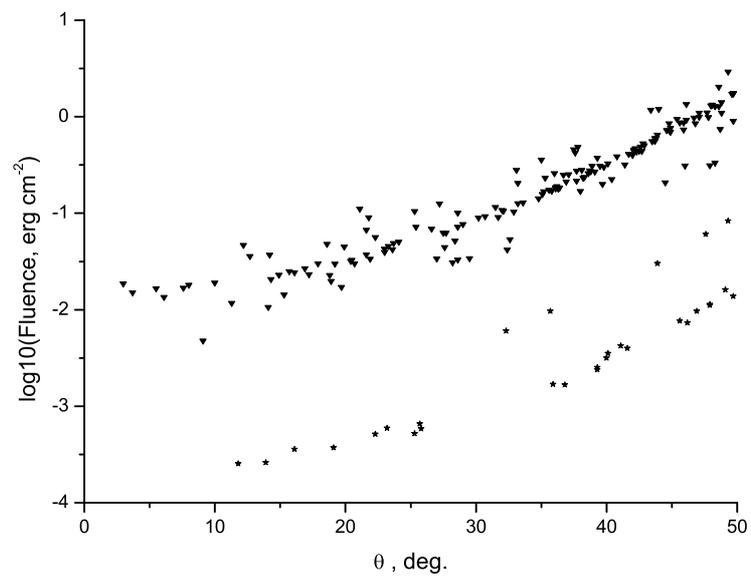


Рис. 13: Верхние пределы на поток энергии прямого излучения в интервале 1 ГэВ – 100 ГэВ для 160 длительных (треугольники) и 29 коротких (звездочки) КГВ как функция зенитного угла.

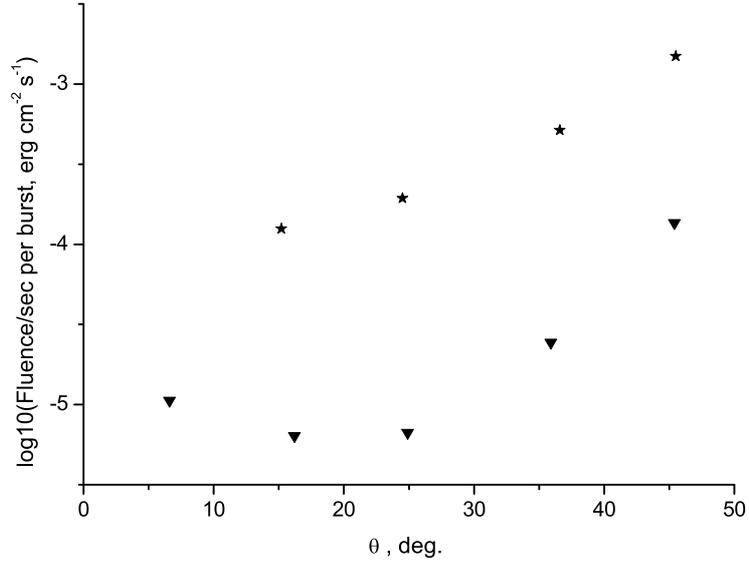


Рис. 14: Верхние пределы на поток энергии прямого излучения в диапазоне 1 ГэВ – 100 ГэВ (в секунду на событие), полученные методом наложения эпох. Длительные КГВ - треугольники, короткие КГВ - звездочки.

дого события был получен верхний предел (на уровне 3σ) на поток энергии во временном окне T_{90} , в диапазоне энергий первичных гамма-квантов 1 ГэВ – 100 ГэВ (рис. 13). Ограничения были вычислены с использованием медианных значений красного смещения z , которые составляют 0.41 для коротких и 1.61 для длительных КГВ. Заметная разница между верхними пределами для коротких и длительных КГВ вызвана двумя причинами: во-первых, большим фоном для длительных всплесков по сравнению с короткими; во-вторых, разницей в красном смещении. Улучшить ограничения на поток γ -излучения высокой энергии в зарегистрированных на борту космических обсерваторий КГВ можно при использовании метода наложения эпох, когда кривые блеска в каждой группе по зенитному углу суммируются относительно времени регистрации всплеска космической обсерваторией. Рассмотрим временное окно T_{90} , значимость отклонений от фона для числа отсчетов в этом интервале в суммарных кривых

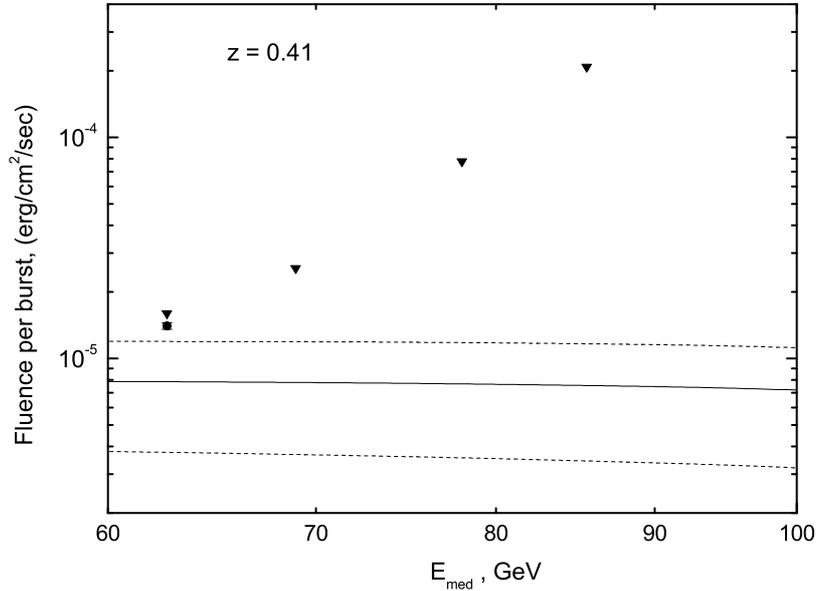


Рис. 15: Зависимость потока энергии продлённого излучения коротких КГВ от медианной энергии регистрируемых γ -квантов для $z = 0.41$. Треугольники - верхние пределы, точка - значение потока энергии для $\bar{\theta} = 15.2^\circ$. Сплошная линия - расчётная зависимость для $z = 0.41$. Штриховые линии ограничивают диапазон одного стандартного отклонения.

блеска получены тем же способом, как и для индивидуальных КГВ. Т.к. в каждом диапазоне по θ присутствуют КГВ различной длительности, суммарное число отсчетов в течение T_{90} нормируется на эту величину, и только затем суммируется. В суммарных кривых блеска также не было обнаружено значимых отклонений, верхние пределы (на уровне 3σ) на поток энергии в интервале 1 ГэВ – 100 ГэВ предстали на рис. 14. Вследствие разницы в длительности всплесков и в числе просуммированных КГВ, отнормированные ограничения заметно лучше для длительных всплесков.

В §3 обсуждаются результаты поиска продленного гамма-излучения высокой энергии в коротких КГВ. В суммарной кривой блеска 4-х коротких КГВ из интервала зенитных углов с $\bar{\theta} = 15.2^\circ$) имеется небольшое превышение над фоном

во временном интервале длительностью 24 с, начинающемся при $t = 5$ секунд. Значимость этого превышения составляет 2.63σ и его можно, в принципе, объяснить продленным излучением высокой энергии, близким по характеристикам к продленному излучению коротких КГВ, обнаруженному ранее в области низких энергий. В других диапазонах зенитных углов не было обнаружено заметных превышений в рассматриваемом временном интервале. Учитывая, что возрастание значимости обнаруженного пика имеет место для любой комбинации индивидуальных КГВ, была сделана оценка вероятности случайной реализации рассматриваемого события: $1.59 \cdot 10^{-4}$. Эта величина соответствует значимости 3.6σ для нормального распределения.

Использование метода наложения эпох позволяет перейти от зенитного угла к медианной энергии КГВ, соответствующей $\bar{\theta}$ для рассматриваемой группы событий, и, таким образом, получить зависимость потока энергии от энергии фотонов. Такой подход позволяет непосредственно сравнивать между собой результаты наземных экспериментов, и, в принципе, результаты наземных экспериментов с результатами экспериментов на борту космических обсерваторий (естественно, при использовании в расчетах потоков энергии одного и того же первичного спектра). Зависимость потока энергии от медианной энергии регистрируемых γ -квантов, полученные в нашем эксперименте для продленного излучения коротких КГВ, представлена на рисунке 15 для $z = 0.41$, вместе с результатами расчёта. Расчёт проведен для степенного спектра фотонов с показателем -1.92 , который фитирует спектр зарегистрированных в интервале 0.9 - 1.0 с LAT/Fermi фотонов от GRB 090510. Можно видеть, что предполагаемый сигнал находится достаточно близок к области $\pm 1\sigma$.

В третьей главе части III приведены результаты поиска всплесков космического гамма-излучения сверхвысокой энергии. Следует заметить, что γ -излучение сверхвысокой энергии от КГВ, из-за взаимодействия с оптическим и

инфракрасным межгалактическим диффузным фоном, можно ожидать только для относительно близких всплесков. Но, если существует нарушение Лоренц-Инвариантности, γ -излучение сверхвысокой энергии может быть обнаружено также и от достаточно далеких объектов.

В §1 рассматривается поиск КГВ с $E_\gamma \gtrsim 0.5$ ТэВ по данным БПСТ. В ТэВ-ой области энергий излучение от γ -всплесков может быть зарегистрировано на подземных (подводных, подледных) нейтринных телескопах по вторичным мюонам, рожденным в результате развития в атмосфере Земли каскада от первичных γ -квантов. Недостатком такого рода экспериментов является относительно низкая эффективность рождения мюонов первичными γ -квантами ($\sim 1\%$ по отношению к первичным протонам). К преимуществам относятся: большое время набора информации (в отличие от черенковских телескопов, нейтринные телескопы работают в режиме постоянного набора информации); более низкий фон космических лучей (в сравнении с наземными установками) и достаточно большая эффективная площадь регистрации (от 10^2 м² и выше).

Для поиска гамма-всплесков по данным БПСТ использовались события, отобранные по условию срабатывания детекторов не менее чем на трех плоскостях БПСТ, при этом обязательно должна сработать какая-либо из внутренних плоскостей. Частота таких событий составляет 7.3 сек^{-1} . Для каждого из этих событий было восстановлено направление прихода мюона (группы мюонов), т.е. зенитный и азимутальный углы (θ, ϕ) в системе координат БПСТ. По результатам проведенной обработки был создан архив первично обработанной информации за период 2001 - 2004 г.г. (чистое время набора ~ 1240 суток, полное число событий $\sim 7.8 \cdot 10^8$), в котором содержится абсолютное время события (с точностью до 0.2 мс), направление прихода мюона (группы мюонов), число мюонных траекторий, пересекающих БПСТ. Эффективное угловое разрешение телескопа для таких событий составляет $\sigma = 1.6^\circ$.

В разделе 1.1. представлены результаты поиска гамма-всплесков по небесной сфере (без привязки к уже зарегистрированным всплескам), который представляет собой поиск пространственно-временных концентраций событий (кластеров). Искались группы ливней, пришедшие из одной угловой ячейки радиуса 2.5° в течение временных интервалов заданной длительности $\Delta t = (10^{-2} - 10)$ сек. Поскольку временные интервалы взяты достаточно малыми, поиск пространственных концентраций событий проводился в горизонтальной системе координат. Размер ячейки $\alpha_r = 1.58 \cdot \sigma$ выбран так, что бы отношение сигнал/фон было максимальным, при этом ячейка содержит приблизительно 72% событий. Каждый кластер характеризуется кратностью (числом ливней) N , длительностью Δt , абсолютным временем T и направлением прихода (θ, ϕ) . Для каждой кратности ($N \geq 2$) были получены зависимости $n(\Delta t)$ числа кластеров n от длительности Δt . Расчет фона случайных совпадений (образования кластеров заданной кратности N) был проведен с помощью аналогичной обработки смоделированных событий. Экспериментально измеренные частоты регистрации кластеров на БПСТ находятся в согласии с частотами, ожидаемыми от фона случайных совпадений (в пределах одного стандартного отклонения), т.е. могут быть объяснены фоном случайных совпадений. Отсюда можно получить ограничения на частоту всплесков космического гамма-излучения, порождающих кластеры данной кратности с данным потоком энергии (рис. 16). В разделе 1.2. рассматриваются результаты поиска гамма-излучения сверхвысокой энергии в КГВ, зарегистрированных на космических аппаратах и описанных в циркулярах GCN. За период наблюдений в поле зрения телескопа (с зенитным углом $\theta \leq 60^\circ$ и пороговой энергией мюона в данном направлении не превышающей 1 ТэВ) попало 33 события. При больших зенитных углах пороговая энергия мюона (и соответствующая энергия первичного гамма-кванта) оказывалась слишком большой. Как для интервала T_{90} , так и для скользящих

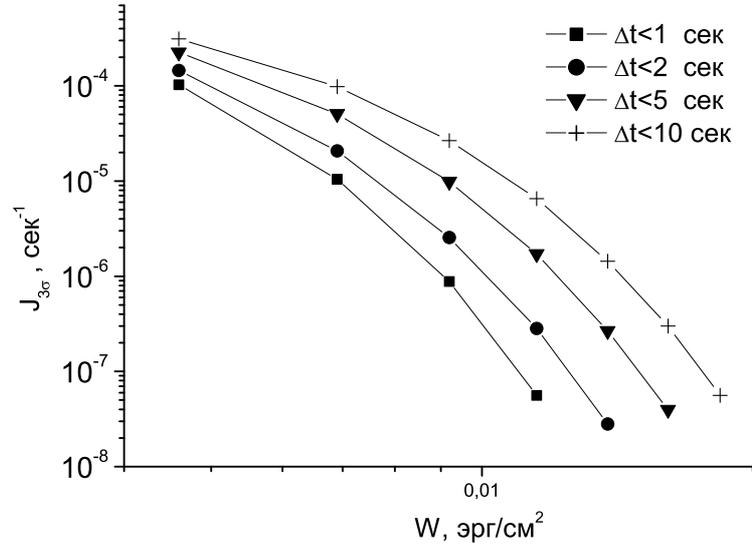


Рис. 16: Ограничения (на уровне трех стандартных отклонений) на частоту гамма-всплесков различной длительности в зависимости от уносимых гамма-квантами потоков энергии W .

интервалов различной длительности в течении ± 2 часов относительно момента всплеска, превышения над фоном обнаружено не было.

В §2 приводятся результаты поиска КГВ с $E_\gamma \gtrsim 60$ Тэв по данным о ШАЛ, зарегистрированных установкой “Андырчи”. Раздел 2.1 посвящен поиску гамма-всплесков $E_\gamma \gtrsim 60$ Тэв по небесной сфере, который проводился по информации 1996-2001 г. Всего было обработано $\sim 6.22 \cdot 10^8$ зарегистрированных установкой “Андырчи” ШАЛ, время набора информации составило ~ 1100 суток. Целью данного анализа, аналогичного проведенному на БПСТ, являлся поиск временных и пространственных концентраций событий (кластеров). Искались группы ливней, пришедшие из одной угловой ячейки радиуса $\alpha = 4.0^\circ$ внутри временных интервалов заданной длительности $\Delta t = (10^{-2} - 10)$ сек. Результаты поиска кластеров по экспериментальным данным “Андырчи” находится в согласии с ожидаемым от фона случайных совпадений, получены верхние пределы на ча-

стоту появления гамма-всплесков в зависимости от уносимых гамма-квантами потоков энергии (в диапазоне $E_1 = 58$ ТэВ, $E_2 = 1600$ ТэВ) для различных длительностей всплесков. В разделе 2.2 рассматриваются результаты поиска гамма-излучения сверхвысокой энергии в КГВ, зарегистрированных BATSE. За период наблюдений с 1996 по 2001 гг. в поле зрения установки “Андырчи” (в данном случае $\theta \leq 60^\circ$) попало 127 гамма-всплесков, зарегистрированных эти прибором. Как для интервала T_{90} , так и для скользящих интервалов различной длительности в течении ± 2 часов относительно момента всплеска, превышения над фоном обнаружено не было.

Часть IV, содержащая 2 главы, посвящена экспериментальному поиску испаряющихся первичных чёрных дыр. Первичные чёрные дыры (ПЧД) могут рождаться в ранней Вселенной вследствие гравитационного коллапса первичных космологических флуктуаций плотности, поэтому вероятность возникновения ПЧД и их наблюдательные проявления существенно зависят от того, как возникли и развивались первичные флуктуации плотности. Теоретические предсказания вероятности рождения ПЧД также сильно зависят от используемой теории гравитации и, что также существенно, от используемой модели гравитационного коллапса. Процесс испарения чёрных дыр, на котором основывается их экспериментальный поиск, также до конца не изучен. Таким образом, обнаружение ПЧД позволит получить ценную информацию о ранней Вселенной и может стать уникальным тестом общей теории относительности, космологии и квантовой гравитации. Из-за того, что локальная плотность ПЧД в нашей галактике может быть на много порядков больше средней плотности ПЧД во Вселенной, ограничения на концентрацию ПЧД, полученные по результатам прямого поиска, могут быть более сильными по сравнению с ограничениями, полученными из измерений диффузного внегалактического гамма-фона.

В первой главе части IV приводятся результаты поиска на установке “Андырчи” всплесков гамма-излучения сверхвысокой энергии от испаряющихся ПЧД в рамках модели испарения без хромосферы. Обсуждается методика регистрации γ -излучения от испаряющейся ПЧД установкой (§1); приводятся результаты анализа зарегистрированных в эксперименте кластеров ливней (§2); вычисляется эффективный объем пространства, просматриваемый установкой и дается ограничение на концентрацию испаряющихся ПЧД (§3); проводится сравнение с результатами других экспериментов (§4).

Поиск всплесков γ -излучения от ПЧД на ливневой установке, также как и поиск всплесков высокоэнергичного космического γ -излучения по небесной сфере, фактически представляет собой поиск пространственно-временных концентраций событий (кластеров). Отбор этих событий и дальнейший их анализ зависит от профиля вспышки, который, в свою очередь, зависит от модели испарения ПЧД и порога по энергии первичных γ -квантов. Спектр излучаемых ПЧД гамма-квантов dN_γ/dE_γ зависит от времени, остающегося до конца испарения черной дыры. Назовем длительностью вспышки t_b для данной установки время, остающееся до конца испарения чёрной дыры, в течение которого излучаются 99% гамма-квантов, которые могут быть зарегистрированы установкой. Зависимость t_b от зенитного угла для установки “Андырчи” приведена на рисунке 17. Из рисунка видно, что установка может регистрировать события от испаряющихся ПЧД в ограниченном диапазоне зенитных углов, т.к. при больших зенитных углах ожидаемая длительность всплесков гамма-излучения становится меньше мертвого времени установки на одно событие t_d .

Результатом эксперимента по поиску ливней, порожденных γ -квантами от испаряющейся ПЧД, являются распределения по длительности кластеров различной кратности для различных диапазонов зенитных углов. Сравнение с расчётами показывает, что зарегистрированные в нашем эксперименте класте-

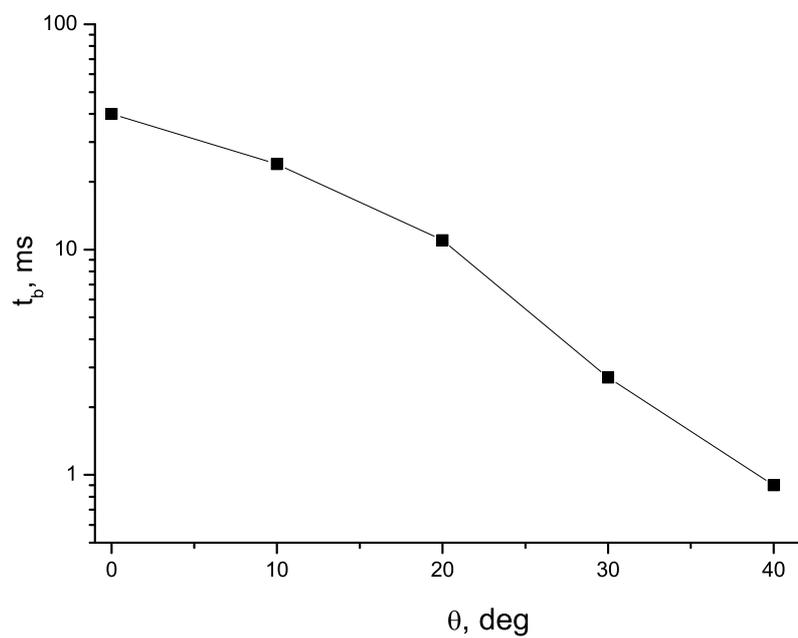


Рис. 17: Зависимость времени вспышки от зенитного угла для установки “Андрычи”.

ры ливней можно в целом объяснить как случайные, по времени и направлению прихода, совпадения ливней космических лучей. Из отсутствия превышений над фоном получено ограничение на концентрацию испаряющихся ПЧД. Если испаряющиеся ПЧД равномерно распределены в локальной области Галактики, то верхний предел ρ_{lim} на концентрацию испаряющихся ПЧД на 99% доверительном уровне равен: $\rho_{lim} = 5.4 \cdot 10^8 \text{ пк}^{-3} \text{ год}^{-1}$.

Поиск всплесков высокоэнергичного γ -излучения от испаряющихся ПЧД ранее проводился в экспериментах на ливневых установках CYGNUS (пороговая энергия первичных γ -квантов $E_{th} \sim 30 \text{ ТэВ}$), HEGRA ($E_{th} \sim 30 \text{ ТэВ}$) и Tibet ($E_{th} \sim 10 \text{ ТэВ}$) для фиксированных одnoseкундных временных интервалов, без учета длительности вспышки (и ее зависимости от зенитного угла для конкретной установки). В этих экспериментах ограничения на концентрацию испаряющихся ПЧД были получены в предположении отсутствия флуктуаций числа попадающих на установку ливней (предполагалось, что $n = \bar{n}$) и без учета влияния временного профиля вспышки и мертвого времени установки на вероятность регистрации всплеска. Последнее особенно важно для установок с высоким порогом регистрации γ -квантов (т.е., с малой длительностью вспышки t_b) и относительно большим мертвым временем t_d . Если при интерпретации данных таких установок не учитывать влияния мертвого времени и временного профиля вспышки на вероятность регистрации всплеска, то это приведет к заметной переоценке этой вероятности (т.е. множителя F в выражении для эффективного объема V_{eff} , приведенном выше) и, как следствие, к недооценке предела на концентрацию ПЧД. В предельном случае установка вообще может быть нечувствительной к всплескам высокоэнергичного γ -излучения от испаряющихся ПЧД, т.к. при $t_d \geq t_b$ за время вспышки может быть зарегистрирован не более чем один γ -квант, а вспышку из n γ -квантов можно зарегистрировать, если $n \cdot t_d < t_b$.

Во второй главе части IV приводятся результаты поиска всплесков гамма-излучения высокой энергии от испаряющихся ПЧД в режиме регистрации одиночной компоненты. Дело в том, что хромосферные модели испарения предсказывают слишком малую длительность всплеска γ -излучения сверхвысокой энергии от ПЧД и, поэтому, не могут быть обнаружены по регистрации ШАЛ. Т.о., для поиска испаряющихся ПЧД в рамках хромосферных моделей испарения необходимо регистрировать γ -излучение в ГэВ-ной области энергий. Такой эксперимент был проведен на ливневых установках “Андырчи” и “Ковер-2”, для целей данной работы использовалась информация, полученная при работе установок в режиме регистрации одиночной компоненты космических лучей.

В §1 рассмотрен отклик установок на всплески γ -излучения от испаряющихся ПЧД для трех моделей испарения: модели без хромосферы и двух хромосферных моделей. Проанализирована чувствительность установок и показано, что для поиска сигнала от испаряющейся ПЧД достаточно использовать данные “Андырчи” и выносных пунктов (ВП) установки “Ковер-2”. Выбор интервала времени Δt , в течение которого следует проводить поиск γ -всплесков от испаряющихся ПЧД на данной установке, зависит как от длительности всплесков, так и от их временного профиля. Была получена зависимость превышения над фоном в единицах среднеквадратичного отклонения от длительности интервала, из которой следует, что в нашем эксперименте поиск событий от испаряющихся ПЧД следует проводить на односекундных интервалах. В §2 проведен анализ полученных экспериментальных данных. Для установки “Андырчи” используется такая же методика анализа экспериментальных данных, что и для поиска гамма-всплесков. При поиске односекундных отклонений в суммарном темпе счета ВП (используется тот же параметр F_i) исключались ложные события, вызванных сбоями в работе аппаратуры и электромагнитными помехами. В §3 приводятся ограничения на концентрацию испаряющихся ПЧД для трех

моделей испарения и проводится сравнение с результатами других экспериментов. В нашем эксперименте получены верхние пределы на концентрацию испаряющихся ПЧД в локальной области космического пространства характерного размера $\sim 10^{-3}$ пк.

В заключении сформулированы основные результаты, представленные в диссертации.

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Е.Н. Алексеев, В.В. Алексеенко, ..., В.Б. Петков и др. Установка “Андырчи” для регистрации ШАЛ над Баксанским подземным сцинтилляционным телескопом. Известия РАН, сер. физ., т.57, в.4, с.99, 1993.

2. E.N. Alexeyev, V.V. Alexeenko, ..., V.B. Petkov et al. The EAS array above the Baksan Underground Scintillation Telescope. Proc. 23th ICRC, Calgary, v.2, p.474, 1993.

3. Е.Н. Алексеев, А.В. Воеводский, ..., В.Б. Петков и др. Установка “Андырчи” для регистрации ШАЛ над Баксанским подземным сцинтилляционным телескопом. Препринт ИЯИ - 853/94, 20 стр., Москва, 1994.

4. В.И. Волченко, А.Ф. Янин, В.Б. Петков, В.Я. Поддубный, С.Н. Карпов, Н.А. Метлинский. Измерение энерговыделения в сцинтилляционном детекторе и послеимпульсы ФЭУ. Препринт ИЯИ -0913/96, 18 стр., Москва, 1996.

5. А.В. Воеводский, В.И. Волченко, ..., В.Б. Петков и др. Угловое разрешение установки “Андырчи”. Препринт ИЯИ-1001/98, 12 с., Москва, 1998.

6. В.Б. Петков. Комплекс установок “Андырчи” - БПСТ Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. Труды Первой Баксанской молодежной школы экспериментальной и теоретической физики “Неускорительная физика вы-

соких энергий”, с. 50, Нальчик, 2000.

7. В.И. Волченко, Г.В. Волченко, А.Н. Заиченко, В.Б. Петков, В.Я. Поддубный, А.В. Радченков. Система молниезащиты установки “Андырчи”. Приборы и техника эксперимента, N 4, с. 35, 2004.

8. В.И. Волченко, Г.В. Волченко, И.М. Дзапарова, С.Н. Карпов, В.Б. Петков. Измерение энерговыделения в сцинтилляционном детекторе и послеимпульсы ФЭУ. Приборы и техника эксперимента, N 4, с. 26, 2005.

9. В.Б. Петков, В.И. Волченко, Г.В. Волченко, Ж.Ш. Гулиев, И.М. Дзапарова, С.Н. Карпов, В.А. Козяревский, А.Н. Куреня, Д.В. Смирнов, А.Б. Черняев, А.Ф. Янин. Установка Андырчи для регистрации космических лучей. Приборы и техника эксперимента, N 6, с. 50, 2006.

10. Д.Д. Джашпуев, В.В. Алексеенко, ..., В.Б. Петков и др. Модернизация установки “Ковёр-2” БНО ИЯИ РАН, Известия РАН, сер. физ., т. 71, в. 4, с.542, 2007.

11. А.В. Воеводский, В.Б. Петков и др. Химический состав первичных космических лучей в области энергий $10^{15} - 10^{16}$ эВ по данным Баксанской нейтринной обсерватории. Известия РАН, сер. физ., т.57, в.4, с.117, 1993.

12. А.В. Воеводский, В.Б. Петков и др. Анализ состава первичных космических лучей при энергии $10^{14} - 10^{16}$ эВ. Группы мюонов большой кратности с энергией > 0.25 ТэВ, Известия РАН, сер. физ., т.58, в.12, с.127, 1994.

13. А.В. Воеводский, ..., В.Б. Петков и др. Первые результаты совместной регистрации ШАЛ с энергией свыше $5 \cdot 10^{14}$ эВ подземным телескопом и наземной установкой “Андырчи”. Известия РАН, сер. физ., т.61, в.3, с.496, 1997.

14. А.Е. Chudakov, V.B. Petkov, V.Ya. Poddubny, A.V. Voevodsky. A measurement of the EAS differential size spectrum around the knee. Proc. 25th ICRC, Durban, v.6, p.177, 1997.

15. А.Е. Chudakov, V.B. Petkov, V.Ya. Poddubny, A.V. Voevodsky. Cosmic

ray composition around the knee from simultaneous surface and underground measurements at Baksan. Proc. 25th ICRC, Durban, v.6, p.173, 1997.

16. В.Б. Петков, В.Я. Поддубный. Измерение дифференциального спектра ШАЛ по числу частиц в диапазоне $N_e = 10^4 - 2 \cdot 10^7$. Известия РАН, сер.физ., т.63, в.3, с. 504, 1999.

17. А.Е. Chudakov, V.B. Petkov, V.Ya. Poddubny, A.V. Voevodsky. Around the knee: simultaneous surface and underground measurement at Baksan. Proc. Xth International Baksan School "Particles and Cosmology", p. 303. Moscow, INR RAS, 2000.

18. В.Б. Петков, В.Я. Поддубный, А.В. Радченков, А.Б. Черняев. Высокоэнергичная мюонная компонента ШАЛ в области излома. Известия РАН, сер.физ., т.66, в. 11, с.1560, 2002.

19. V.B. Petkov, O.D. Lalakulich, and G.M. Vereshkov. Cosmic Ray "Knee" in the Spectrum and Proton-Proton Cross Section from the Point of View of New Quarks. Ядерная физика, т.66, N 3, с. 550, 2003.

20. V.B. Petkov et al. EAS High Energy Muon Component Around the Knee: Simultaneous Surface and Underground Measurements at Baksan. Proc. 28th ICRC, v.1, p.65, Tsukuba, 2003.

21. V.B. Petkov. The knee of EAS size spectrum, missing component and very high energy muons. International Journal of Modern Physics A, v. 20, No.29, p. 6846, 2005.

22. В.Б. Петков. О возможности изучения флуктуаций множественности в группах мюонов. Известия РАН, сер.физ., т. 71, в. 4, с. 566, 2007.

23. V.B. Petkov, J. Szabelski, D.V. Smirnov, R.V. Novoseltseva. High energy muon number spectrum detected at the Baksan Underground Scintillation Telescope. Nuclear Physics B (Proc. Suppl.), V. 175-176, p. 362, 2008.

24. V.B. Petkov, I. Alikhanov, J. Szabelski. Lateral distribution function of high

energy muons in EAS around the knee. Nuclear Physics B (Proc. Suppl.), v.196, p. 379, 2009.

25. V.B. Petkov. The Andyrchy-BUST experiment: primary spectrum and composition around the knee. 31st International Cosmic Ray Conference (Lodz, Poland, 7-15 July 2009). Invited, Rapporteur and Highlight Papers, p.127, Lodz, 2010.

26. V.B. Petkov and J. Szabelski. Study of the primary spectrum and composition around the knee at the Andyrchy-BUST experiment. Astrophys. Space Sci. Trans., **7**, 111, 2011.

27. А.В. Воеводский, В.Б. Петков, В.Я. Поддубный, А.Е. Чудаков. Поиск гамма-всплесков с $E_\gamma \geq 10$ ГэВ. Известия РАН, сер.физ., т.63, в.3, с.612, 1999.

28. V.V. Alekseenko, A.B. Chernyaev, N.S. Khaerdinov, N.S. Karpov, V.B. Petkov, V.Y. Poddubny. Search for gamma-ray burst at energy $E_\gamma \geq 10$ GeV. Proc. 27 ICRC, p. 2746, Hamburg, 2001.

29. V.V. Alexeenko, A.B. Chernyaev, V.B. Petkov and V.Ya. Poddubny. Search for gamma-ray burst at energy $E_\gamma \geq 10$ GeV. Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) **110**, 472, 2002.

30. В.Б. Петков и др. Поиск гамма-всплесков высокой энергии. Кинематика и физика небесных тел, N 4, с. 234, 2003.

31. В.Б. Петков. Космические гамма-всплески. Труды третьей Баксанской молодежной школы экспериментальной и теоретической физики, “Физика элементарных частиц и космических лучей”, т.2, стр.58, Нальчик, 2004.

32. V.B. Petkov et al. Search for high energy gamma-bursts. Third Rome Workshop on Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era, ASP Conference Series, Vol. 312, p.122, 2004.

33. Д.В. Смирнов, ..., В.Б. Петков и др. Поиск космических гамма-всплесков высокой энергии на установке “Андырчи” БНО ИЯИ РАН. Известия РАН,

сер.физ., т.69, в. 3, с. 413, 2005.

34. Д.В. Смирнов, В.Б. Петков, С.Н. Карпов, П.С. Стриганов. Поиск всплесков космического гамма-излучения на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе. Препринт ИЯИ - 1143/2005, Москва, 2005.

35. D.V. Smirnov, V.B. Petkov, S.N. Karpov. Search for TeV gamma rays from GRBs at Baksan Underground Scintillation Telescope. Proc. 29 ICRC, Pune, v.4, p. 447, 2005.

36. D.V. Smirnov,..., V.B. Petkov et al. Search for UHE gamma-ray short transients at Andyrchy EAS array. Proc. 29 ICRC, Pune, v.4, p.451, 2005.

37. Д.В. Смирнов, В.Б. Петков, С.Н. Карпов. Поиск всплесков космического гамма-излучения сверхвысокой энергии на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе. Письма в *Астрономический Журнал*, т. 32, N 1, с. 3, 2006.

38. В.Б. Петков и др. Поиск гамма излучения высокой энергии от космических гамма всплесков. *Известия РАН, сер.физ.*, т. 75, в. 3, с. 468, 2011.

39. V.B. Petkov et al. "Search for high energy gamma-ray bursts *Astrophys. Space Sci. Trans.*, **7**, 97, 2011.

40. V.B. Petkov, A.S. Pozanenko, and V.M. Loznikov. Searching for GeV energy from short Gama-Ray Bursts. Proc. of Gamma Ray Bursts 2010 Conference (Nov 1-4, 2010, Annapolis, USA), AIP Conf. Proc. V. 1358, pp. 217-220, 2011.

41. E. Bugaev, P. Klimai, V. Petkov. Photon spectra from final stages of a primordial black hole evaporation in different theoretical models. Proc. 30th ICRC (Merida, Mexico, 2007.), Vol. 3, p. 1123, 2008. Также в arXiv:0706.3778v1 [astro-ph], 2007.

42. В.Б. Петков, Э.В. Бугаев, П.А. Климай, Д.В. Смирнов. Ограничения на концентрацию испаряющихся первичных черных дыр для хромосферных моделей испарения. Письма в *ЖЭТФ*, т.87, в.1, с.3, 2008.

43. В.Б. Петков и др. Поиск всплесков гамма-излучения сверхвысокой энер-

гии от испаряющихся первичных черных дыр. Письма в *Астрономический Журнал*, т. 34, N 8, с. 563, 2008.

44. В.Б. Петков, Э.В. Бугаев, П.А. Климай, А.Н. Гапоненко, П.С. Стриганов. О методике поиска всплесков гамма-излучения сверхвысокой энергии от испаряющихся первичных черных дыр на ливневых установках. Препринт ИЯИ РАН 1209/2008, Москва, ИЯИ РАН, 2008.

45. E.V. Bugaev, V.B. Petkov et al. Experimental search of bursts of very high energy gamma rays from primordial black holes. Proc. 31st ICRC, Lodz (Poland), 7-15 July 2009, icrc0374. Также в arXiv:0906.3179v1[astro-ph.CO], 2009.

46. E.V. Bugaev, V.B. Petkov et al. Experimental search of bursts of gamma rays from primordial black holes using different evaporation models. Proc. 31st ICRC, Lodz (Poland), 7-15 July 2009, icrc0379. Также в arXiv:0906.3182v1 [astro-ph.CO], 2009.

47. В.Б. Петков и др. Экспериментальный поиск всплесков гамма-излучения от испаряющихся первичных черных дыр. *ЖЭТФ*, т. 137, в. 3, с. 460, 2010.