

# КОСМОМИКРОФИЗИКА. ЭКСПЕРИМЕНТЫ В БАКСАНСКОЙ НЕЙТРИННОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

*В. Б. Петков* \*

Институт ядерных исследований РАН, Москва

Баксанская нейтринная обсерватория (БНО) Института ядерных исследований РАН является одним из крупнейших центров, в котором проводятся исследования в области космомикрoфизики (в англоязычной литературе — «Astroparticle Physics»). В данной работе приводится краткий обзор экспериментальных исследований в данной области, проведенных на комплексе установок, состоящем из Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа (БПСТ) и ливневых установок «Ковер-2» и «Андырчи».

The Baksan neutrino observatory (BNO) of the Institute for Nuclear Research of RAS is one of the first-rate scientific centers where the experimental research in the field of astroparticle physics is performed. In this paper, a short review of studies at the unique complex of surface and underground experimental facilities, consisting of the Baksan underground scintillation telescope (BUST) and EAS arrays “Carpet-2” and “Andyrchy”, is presented.

PACS: 97.60.Bw; 95.85.Ry

## **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время бурно развивается область фундаментальных исследований, получившая в англоязычной литературе название «Astroparticle Physics» (в русскоязычной часто используют название «космомикрoфизика»). Данная область исследований охватывает поиск и всестороннее изучение 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 исследованиях с использованием потоков частиц природного

---

\*E-mail: vpetkov@inr.ru

происхождения (в том числе потоков частиц космического излучения). Исследования в области космомикрoфизики 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 (географические координаты  $43,28^\circ$  с. ш. и  $42,69^\circ$  в. д., эффективная жесткость геомагнитного обрезания 5,7 ГВ). В БНО имеется уникальный комплекс экспериментальных установок, на которых в течение более чем сорока лет проводятся исследования в указанной области фундаментальной физики [1]. Программа исследований обсерватории постоянно расширялась по мере введения в строй новых наземных и подземных установок.

## 1. КОМПЛЕКС УСТАНОВОК

Комплекс установок состоит из Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа (БПСТ) и ливневых установок «Ковер-2» и «Андырчи». Установки являются многоцелевыми, на них проводятся экспериментальные исследования в области физики космических лучей, гамма-астрономии, нейтринной физики и астрофизики.

БПСТ расположен в подземной лаборатории под склоном горы Андырчи на эффективной глубине 850 м в. э., высоте над уровнем моря — 1700 м [2,3]. Установка имеет размеры  $17 \times 17 \times 11$  м и состоит из четырех горизонтальных и четырех вертикальных сцинтилляционных плоскостей. Плоскости телескопа покрыты стандартными сцинтилляционными счетчиками, полное число которых составляет 3184 (полная масса сцинтиллятора 330 т). Стандартный сцинтилляционный счетчик БПСТ представляет собой алюминиевый контейнер размером  $0,7 \times 0,7 \times 0,3$  м, заполненный жидким органическим сцинтиллятором на основе уайт-спирита. Объем сцинтиллятора просматривается одним фотоумножителем ФЭУ-49Б с диаметром фотокаатода 15 см. Наиболее вероятное энерговыделение в счетчике от мюонов равно 50 МэВ. Триггером для запуска системы регистрации является срабатывание импульсного канала любого счетчика БПСТ. Темп счета такого триггера  $17 \text{ с}^{-1}$ .

Установка «Андырчи» расположена на склоне горы Андырчи над БПСТ и состоит из 37 сцинтилляционных счетчиков на основе пластического сцинтиллятора [4]. Пластический сцинтиллятор площадью  $1 \text{ м}^2$  просматривается одним ФЭУ-49Б. Сцинтилляционные счетчики предназначены как для временных измерений (с целью определения направления прихода ШАЛ), так и для измерения энерговыделения (с целью определения положения оси и пол-

ного числа частиц в ливне). Ливневый триггер вырабатывается при одновременном срабатывании  $\geq 4$  счетчиков на установке, частота триггера  $\sim 9 \text{ с}^{-1}$ . Расстояние между счетчиками в горизонтальной плоскости  $\approx 40 \text{ м}$ . Центральный счетчик установки расположен непосредственно над БПСТ, расстояние по вертикали составляет  $\sim 350 \text{ м}$ . Полная площадь установки  $5 \cdot 10^4 \text{ м}^2$ ; телесный угол, под которым она видна из телескопа,  $0,35 \text{ ср}$ . Центр установки находится на высоте  $2057 \text{ м}$  над уровнем моря, перепад высот между верхним и нижним рядами сцинтиляционных счетчиков составляет  $\sim 150 \text{ м}$ .

Установка «Ковер-2» [6] расположена у подножия горы Андырчи на расстоянии  $900 \text{ м}$  от БПСТ, на высоте  $1700 \text{ м}$  над уровнем моря (что соответствует глубине в атмосфере  $840 \text{ г/см}^2$ ). Центральная часть установки (собственно «Ковер» [5]) находится в здании под крышей толщиной  $29 \text{ г/см}^2$  и состоит из  $400$  жидкостных сцинтиляционных счетчиков (такого же типа, как и на БПСТ), расположенных в виде квадрата со стороной  $14 \text{ м}$  и покрывающих сплошную площадь  $196 \text{ м}^2$ . Вокруг «Ковра» расположены шесть выносных пунктов (ВП) с тонкой крышей ( $\sim 1,2 \text{ г/см}^2$ ), в каждом из которых находятся по  $18$  таких же счетчиков. Сигналы с ВП используются для определения направления прихода ливней.

Здание мюонного детектора (МД) состоит из трех тоннелей площадью  $205 \text{ м}^2$  каждый. Толщина поглотителя равна  $500 \text{ г/см}^2$ , что соответствует пороговой энергии мюонов  $1 \text{ ГэВ}$  для вертикального направления. Расстояние между центрами «Ковра» и МД равно  $47 \text{ м}$ . С  $1999 \text{ г.}$  работает первая очередь МД площадью  $175 \text{ м}^2$ , состоящая из расположенных в центральном тоннеле  $175$  сцинтиляционных счетчиков такого же типа, как и применяемые на установке «Андырчи». В настоящее время в рамках создания установки «Ковер-3» сцинтиляционными счетчиками полностью заполнены два тоннеля и общая площадь МД доведена до  $410 \text{ м}^2$ .

Все установки комплекса работают в режиме непрерывной регистрации космических лучей. Сбор информации с установок и предварительная ее обработка проводятся on-line компьютерами каждой установки, число и конфигурация которых зависят от решаемых в данный момент задач.

## 2. ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРА И СОСТАВА ПЕРВИЧНОГО КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Одной из фундаментальных проблем астрофизики высоких энергий является проблема происхождения космических лучей. Измерения спектра и ядерного состава первичного космического излучения (ПКИ) позволяют сделать выводы о возможных механизмах ускорения и распространения космических лучей. По современным представлениям установление природы излома в спектре первичных космических лучей (при  $E_0 \sim 3 \cdot 10^{15} \text{ эВ}$ , где показатель

степенного спектра меняется от  $\approx -2,7$  до  $\approx -3,1$ ) может быть ключом к решению проблемы происхождения космических лучей. Различные модели ускорения и распространения космических лучей в Галактике предсказывают, соответственно, различные формы излома.

Так как прямые методы изучения ядерного состава ПКИ (эксперименты на спутниках и на баллонах) становятся неэффективными в области первичных энергий  $10^{14}$ – $10^{15}$  эВ на ядро, изучение спектра и состава при этих и более высоких энергиях возможно только косвенным методом — посредством изучения характеристик широких атмосферных ливней (ШАЛ). Для получения более полной информации о ПКИ необходимо одновременно измерять параметры различных компонент ШАЛ. Методы восстановления спектра и состава ПКИ (спектров различных групп ядер ПКИ) по измерениям характеристик различных компонент ШАЛ опираются на модельно-зависимые расчеты развития ШАЛ в атмосфере. Поскольку ни одна из используемых в настоящее время моделей не воспроизводит целиком как полный набор полученных в космических лучах данных, так и имеющиеся экспериментальные данные ЛНС, то совместный анализ измеренных характеристик различных компонент ШАЛ, особенно полученных в одном и том же эксперименте, может быть использован как для изучения спектра и состава первичных космических лучей, так и для тестирования моделей взаимодействия.

**2.1. Изучение мюонных групп на БПСТ.** Изучение групп мюонов в подземных экспериментах позволяет получить информацию о спектре и составе первичного космического излучения в диапазоне энергий  $10^{12}$ – $10^{16}$  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). Интерпретация экспериментальных данных, полученных в косвенных измерениях, требует проведения модельных расчетов. Использование различных моделей взаимодействия в программах моделирования ШАЛ для интерпретации одних и тех же экспериментальных данных приводит зачастую к разным выводам о спектре и составе ПКИ. Поэтому при решении этой задачи по данным косвенных измерений необходимо одновременно выбрать модель взаимодействия и получить информацию о спектре и составе ПКИ.

В течение многих лет на БПСТ проводилось изучение различных характеристик групп мюонов [7–10]. Спектр по числу мюонов в установке чувствителен к спектру и составу ПКИ (рис. 1), но зависит также от функции пространственного распределения (ФПР) мюонов в ливнях. Та как положение оси ливня в подземных экспериментах не определяется, для измерения функции пространственного распределения (ФПР) мюонов в ливнях используется метод декогерентной кривой. Следует отметить, что из-за падающего спектра по числу мюонов в группе основной вклад в декогерентную кри-

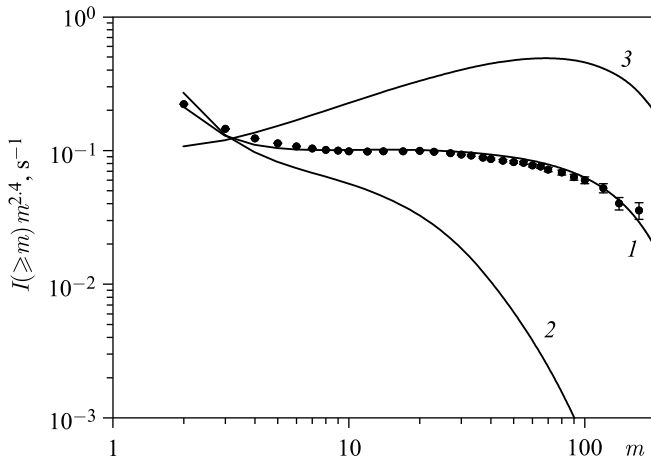


Рис. 1. Спектр групп по числу мюонных траекторий, измеренный на БПСТ ( $\theta \leq 20^\circ$ ,  $E_\mu \geq 230$  ГэВ). Точки — эксперимент. Расчет: 1 — легкий состав ПКИ [10], излом при  $E_{kz} = Z \times 2,0 \cdot 10^{15}$  эВ; 2 — чисто протонный состав,  $\gamma_p = 2,76$ ; 3 — чисто железный состав,  $\gamma_{Fe} = 2,68$

вую и, соответственно, в ФПР вносят группы малой кратности (2–4 мюона в установке).

На рис. 1 приведен измеренный на БПСТ интегральный спектр групп по числу мюонных траекторий  $m$  за чистое время набора 9,8 года для околовертикального направления ( $\theta \leq 20^\circ$ , эффективная пороговая энергия мюонов 230 ГэВ). Представленный диапазон по числу мюонных траекторий в БПСТ 1–170 соответствует диапазону первичных энергий  $10^{12}$ – $10^{16}$  эВ. В данном случае верхняя граница диапазона определяется из условия  $m_\mu/m \leq 1,5$ , т. е. требуется, чтобы занижение числа мюонных траекторий  $m$  относительно падающего на телескоп числа мюонов  $m_\mu$  не превышало 50 %. Следует отметить, что в представленном спектре полное число событий с числом траекторий  $\geq 170$  равно 49, из них 30 — с числом траекторий  $\geq 200$  и 10 событий — с числом траекторий в БПСТ  $\geq 250$ . На этом же рисунке приведены рассчитанные спектры для чисто протонного ( $\gamma_p = 2,76$ ) и чисто железного составов ( $\gamma_{Fe} = 2,68$ ), а также для так называемого легкого состава ПКИ [10].

**2.2. Одновременное измерение высокоэнергетической мюонной и электронно-фотонной компонент ШАЛ.** С помощью установок БПСТ и расположенной над ним ливневой установки «Андырчи» можно одновременно измерять параметры высокоэнергетической мюонной ( $E \geq 230$  ГэВ) и электронно-фотонной компонент широких атмосферных ливней. Мюоны высокой энергии рождаются в нескольких первых актах взаимодействия (в верхних слоях

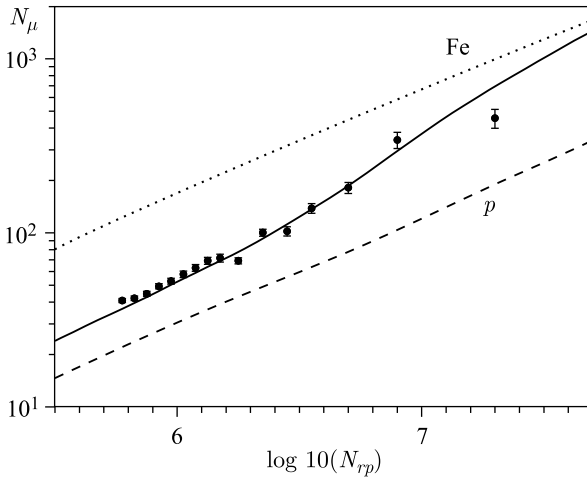


Рис. 2. Зависимость среднего числа мюонов в ШАЛ от мощности ливня. Точки — эксперимент. Расчет для модифицированной зависимости  $\overline{N}_{rp}(E_0)$  [11]: сплошная линия — вариант легкого состава ПКИ; штриховая и пунктирная линии — первичные протоны и ядра железа соответственно

атмосферы), следовательно, изучение высокоэнергетической мюонной компоненты ШАЛ дает информацию о первичных космических лучах и параметрах адрон-адронных взаимодействий.

Одним из возможных способов изучения ядерного состава ПКИ является измерение таких характеристик высокоэнергетической мюонной компоненты ШАЛ, как зависимости функции пространственного распределения и среднего числа высокоэнергетических мюонов в ливне от мощности ШАЛ. На рис. 2 приведена измеренная в эксперименте БПСТ-«Андырчи» зависимость среднего числа высокоэнергетических мюонов в ливне от мощности ШАЛ вместе с расчетами для различных вариантов первичного состава.

### 3. НЕЙТРИННАЯ АСТРОФИЗИКА

На БПСТ эксперимент по поиску нейтринных вспышек от взрывов сверхновых с коллапсом ядра в Галактике проводится с 30 июня 1980 г. [12–15]. Большинство событий, регистрируемых БПСТ от взрыва сверхновой, будет от электронных антинейтрино, так как реакция обратного бета-распада

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+ \quad (1)$$

обладает максимальным сечением. Если средняя энергия антинейтрино  $E_{\nu_e} = 12\text{--}15$  МэВ, то пробег  $e^+$ , рожденного в реакции (1), будет заключен, как правило, в объеме одного сцинтилляционного счетчика. Поиск таких всплесков заключается в регистрации кластера одиночных событий, когда в телескопе срабатывает один и только один счетчик из 3184 в течение временного интервала  $\tau = 20$  с (согласно современным моделям длительность нейтринной вспышки от СН не превышает 20 с).

За 37 лет наблюдений (с 30 июня 1980 г. по 30 июня 2017 г.) чистое время набора информации на БПСТ составило 31,72 года. Это максимальное время поиска всплесков коллапсных нейтрино в Галактике на одной и той же установке. За это время ни одного события-кандидата на коллапс звездного ядра зарегистрировано не было, что дает значение верхней границы средней частоты гравитационных коллапсов в Галактике

$$f_{\text{col}} < 0,073 \text{ год}^{-1} \quad (2)$$

на 90%-м уровне достоверности.

Первая и пока единственная сверхновая, от которой было зарегистрировано нейтринное излучение, — SN 1987A — вспыхнула на расстоянии 50 кпк в соседней галактике Большое Магелланово Облако. Детектирование нейтрино от сверхновой SN 1987A явилось экспериментальным подтверждением крайне важной роли нейтрино в процессе взрыва массивных звезд. Одним из четырех детекторов, зарегистрировавших 30 лет назад нейтринные сигналы от SN 1987A, был Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп [16].

Эксперимент по регистрации мюонных нейтрино из нижней полусферы проводится на БПСТ с декабря 1978 г. [17]. По данным эксперимента были получены ограничения на нейтринный поток от астрофизических источников и параметры нейтринных осцилляций [18, 19]. По экспериментальным данным БПСТ за 24,12 года чистого времени проведен поиск сигнала от аннигиляции частиц темной материи в центре Солнца. Превышения сигнала от Солнца над фоном мюонных нейтрино атмосферного происхождения не обнаружено. Получены новые ограничения на величину сечения разных типов взаимодействий реликтовых частиц темной материи с нуклонами [20]. Проводился поиск мюонных нейтрино, совпадающих по времени и направлению с космическими гамма-всплесками (КГВ). Таких событий обнаружено не было, поставлены новые пределы на поток нейтрино от КГВ [21].

#### 4. ГАММА-АСТРОНОМИЯ

В области гамма-астрономии на различных установках комплекса проводились эксперименты в широком диапазоне первичных энергий по поиску локальных источников космического гамма-излучения, поиску диффузного

гамма-излучения и поиску вспышек космического гамма-излучения различного происхождения (в том числе от космических гамма-всплесков и гипотетических испаряющихся первичных черных дыр).

На установке «Ковер» в 1980-е гг. проводился эксперимент по поиску локальных источников гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ. От Крабовидной туманности была зарегистрирована вспышка гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ [22], в то время как для других вероятных источников гамма-излучения были получены лишь верхние пределы на потоки гамма-квантов [23]. Наливневой установке «Ковер-2» по экспериментальным данным за чистое время набора 9,2 года получены лучшие на данный момент ограничения на поток космического диффузного гамма-излучения с энергией выше 930 ТэВ [24].

На установках комплекса проводился поиск всплесков космического гамма-излучения в широком диапазоне энергий первичных гамма-квантов: 1 ГэВ – 100 ТэВ. По результатам поиска гамма-излучения от зарегистрированных на космических аппаратах гамма-всплесков во время всплеска и в разных временных диапазонах вокруг него были получены ограничения на потоки энергии, уносимой высокоэнергетическими гамма-квантами. Также проводился поиск гамма-всплесков по небесной сфере (без привязки к уже зарегистрированным всплескам), т. е. поиск транзиентов только по данным наших установок. Получены верхние пределы на частоту появления всплесков различной длительности с разными потоками энергии [25–28].

По современным представлениям на последней стадии испарения первичные черные дыры (ПЧД) генерируют всплески высокоэнергетического  $\gamma$ -излучения, т. е. значительные и локализованные во времени превышения  $\gamma$ -излучения над фоном. Поскольку расчетные временные и энергетические характеристики таких всплесков зависят от теоретической модели испарения, методика экспериментального поиска и, соответственно, получаемые ограничения на концентрацию ПЧД в космическом пространстве являются модельно-зависимыми. Экспериментальный поиск испаряющихся ПЧД был проведен на установках «Андырчи» и «Ковер-2» в широком диапазоне энергий первичных  $\gamma$ -квантов для нескольких моделей испарения, для каждой из которых получены ограничения на концентрацию испаряющихся ПЧД в космическом пространстве [29–32].

## 5. ПЕРСПЕКТИВЫ

Перспективы исследований в области «Astroparticle Physics» в Баксанской нейтринной обсерватории связаны как с дальнейшим развитием уже существующих установок, так и с созданием новых.

Для решения проблемы происхождения космических лучей необходим совместный анализ разных типов взаимодополняющих друг друга экспери-



ментальных данных. Непосредственно спектр и массовый состав космических лучей измеряются в широком диапазоне первичных энергий, в локальной области космического пространства. В настоящее время в БНО на базе установки «Ковер-2» создается многоцелевая установка для регистрации ШАЛ «Ковер-3», которая, как планируется, сможет эффективно разделять ШАЛ, рожденные первичными частицами различных типов. Комплекс установок БПСТ, «Ковер-3» и «Андырчи» позволит проводить изучение спектра и состава первичного космического излучения различными методами в широком диапазоне первичных энергий: от  $10^{12}$  до  $10^{17}$  эВ.

В отличие от космических лучей (протонов и ядер более тяжелых элементов), которые являются заряженными частицами и отклоняются в межзвездных магнитных полях, первичные гамма-кванты дают информацию о пространственном распределении и характеристиках мест ускорения космических лучей и о плотности космических лучей в межзвездном пространстве. Создаваемая установка «Ковер-3» будет иметь наилучшую чувствительность к потоку первичных гамма-квантов с энергиями в диапазоне 100 ТэВ – 1 ПэВ [24]. Ожидается, что в новом эксперименте будет измерен поток космического диффузного гамма-излучения с энергией гамма-квантов выше 100 ТэВ, т. е. будет получено лучшее в мире ограничение на поток таких фотонов, позволяющее решить проблему происхождения высокоэнергетических астрофизических нейтрино, зарегистрированных детектором IceCube.

Для исследования астрофизических процессов с большим выделением энергии в настоящее время все чаще применяется подход так называемой всеволновой астрономии (multi-messenger astronomy), когда совместно используются результаты наблюдений электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн (включая гамма-излучение высокой энергии) нейтрино, космических лучей и в последнее время гравитационных волн. Анализ результатов таких наблюдений позволяет повысить информативность при изучении астрофизических процессов и чувствительность при поиске источников космического излучения. Работы в данной области также начаты на комплексе установок БНО (БПСТ, «Ковер-2» и «Андырчи»). По сигналам от наших установок телескопами обсерватории на пике Терскол проводится оперативный поиск оптических партнеров всплесков космического излучения высокой и сверхвысокой энергии. Регистрируемые на БПСТ мюонные нейтрино с энергией выше 1 ГэВ приходят из южной полусферы. Для оперативного поиска партнеров нейтринных событий в оптическом диапазоне планируется использовать расположенные в южном полушарии телескопы глобальной сети МАСТЕР.

В настоящее время ведутся исследования, направленные на создание в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН многоцелевого нейтринного детектора большого объема на основе жидкостного сцинтиллятора с массой мишени 5–20 кт [33]. Баксанский сцинтилляционный детектор большого

объема (БСДБО) предназначен для регистрации природных потоков нейтрино низкой энергии различного происхождения, в том числе нейтрино и антинейтрино от Солнца, Земли и различных астрофизических источников. Одна из приоритетных задач нового детектора — поиск изотропного потока нейтрино, накопившихся во Вселенной за миллиарды лет при гравитационных коллапсах ядер массивных звезд и образовании нейтронных звезд и черных дыр.

Работа выполнена на УНУ Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп (ЦКП Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН) при поддержке Программы фундаментальных научных исследований Президиума РАН «Физика фундаментальных взаимодействий и ядерные технологии».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kuzminov V. V.* The Baksan Neutrino Observatory // *Eur. Phys. J. Plus.* 2012. V. 127. P. 113.
2. *Alekseyev E. N. et al. (BUST Collab.)*. Baksan Underground Scintillation Telescope // *Proc. of the 16th ICRC.* 1979. V. 10. P. 276.
3. *Alekseyev E. N. et al. (BUST Collab.)*. The Baksan Underground Scintillation Telescope // *Phys. Part. Nucl.* 1998. V. 29. P. 254.
4. *Петков В. Б., Волченко В. И., Волченко Г. В., Гулиев Ж. Ш., Дзапарова И. М., Карпов С. Н., Козяревский В. А., Куреня А. Н., Смирнов Д. В., Черняев А. Б., Янин А. Ф.* Установка «Андырчи» для регистрации космических лучей // *ПТЭ.* 2006. № 6. С. 50.
5. *Алексеев Е. Н., Глемба П. Я., Куликов Г. В., Лидванский А. С., Марков В. Я., Молчанова Н. И., Сулаков В. П., Татьяна Б. Б., Тизенгаузен В. А., Христиансен Г. Б., Чудаков А. Е.* Установка для изучения центральной части ШАЛ при помощи сцинтилляционного детектора площадью 200 м<sup>2</sup> // *Изв. АН СССР. Сер. физ.* 1976. Т. 40. С. 994.
6. *Джаппуев Д. Д., Алексеенко В. В., Волченко В. И., Волченко Г. В., Гулиев Ж. Ш., Гулиева Е. В., Куджаев А. У., Лидванский А. С., Михайлова О. И., Петков В. Б., Смирнов Д. В., Степанов В. И., Стенькин Ю. В., Хаердинов Н. С.* Модернизация установки «Ковер-2» БНО ИЯИ РАН // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2007. Т. 71, № 4. С. 542.
7. *Будко Е. В., Воеводский А. В., Догужаев В. А., Михелев А. Р., Падей В. А., Петков В. Б., Стриганов П. С., Суворова О. В., Чудаков А. Е.* Группы мюонов высокой энергии и химический состав первичных космических лучей // *Изв. АН СССР. Сер. физ.* 1985. Т. 49, № 7. С. 1373.
8. *Budko E. V., Chudakov A. E., Dogujaev V. A., Mihelev A. R., Padey V. A., Petkov V. B., Striganov P. S., Suvorova O. V., Voevodsky A. V.* Muon Groups and Primary Composition at 10<sup>13</sup>–10<sup>15</sup> eV // *Proc. of the 19th ICRC.* La Jolla, 1985. V. 8. P. 24.

9. *Воеводский А. В., Цябук А. Л., Чудаков А. Е.* Группы мюонов в подземном эксперименте и химический состав первичных космических лучей // *ЯФ*. 1993. Т. 56, вып. 12. С. 143.
10. *Petkov V. B., Szabelski J., Smirnov D. V., Novoseltseva R. V.* High Energy Muon Number Spectrum Detected at Baksan Underground Scintillation Telescope // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*. 2008. V. 175–176. P. 362.
11. *Petkov V. B.* The Andyrchy-BUST Experiment: Primary Spectrum and Composition around the Knee // *Proc. of the 31st Intern. Cosmic Ray Conf. Invited, Rapporteur and Highlight Papers*. Lodz, 2010. P. 127; arXiv:0911.5679.
12. *Алексеев Е. Н., Алексеева Л. Н., Волченко В. И., Закидышев В. Н., Короткий Г. Д., Метлинский Н. А., Поддубный В. Я., Реутов А. Ю., Чудаков А. Е., Янин А. Ф.* Ограничение на частоту коллапсов массивных звезд в Галактике по данным наблюдения в 1980–1992 годах на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе // *ЖЭТФ*. 1993. Т. 104, вып. 3(9). С. 2879.
13. *Алексеев Е. Н., Алексеева Л. Н.* Двадцать лет наблюдения за Галактикой в поисках всплесков коллапсных нейтрино на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе // *ЖЭТФ*. 2002. Т. 122, вып. 1(7). С. 10.
14. *Novoseltseva R. V. et al. (BUST Collab.)*. The Search for Neutrino Bursts from Supernovae with Baksan Underground Scintillation Telescope // *Phys. Part. Nucl.* 2016. V. 47, No. 6. P. 968.
15. *Новосельцев Ю. Ф., Болиев М. М., Волченко В. И., Волченко Г. В., Дзапарова И. М., Кочкаров М. М., Новосельцева Р. В., Петков В. Б., Янин А. Ф.* Поиск нейтринных вспышек в Галактике; 36 лет экспозиции // *ЖЭТФ*. 2017. Т. 152, вып. 1(7). С. 89.
16. *Алексеев Е. Н., Алексеева Л. Н., Волченко В. И., Кривошеина И. В.* О возможной регистрации нейтринного сигнала 23 февраля 1987 года на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе ИЯИ АН СССР // *Письма в ЖЭТФ*. 1987. Т. 45, вып. 10. С. 461.
17. *Chudakov A. E., Makoev B. A., Malovichko Yu. V., Markov V. Ya., Mikheyev S. P., Stepanov V. I., Zakidyshev V. N.* Study of High Energy Cosmic Ray Neutrinos // *Proc. of the 16th ICRC*. 1979. V. 10. P. 287.
18. *Boliev M. M., Butkevich A. V., Chudakov A. E., Mikheyev S. P., Suvorova O. V., Zakidyshev V. N.* Search for Astrophysical Sources of Neutrinos and Neutrino Oscillations Using the Baksan Data // *Proc. of the 24th ICRC*. 1995. V. 1. P. 722.
19. *Boliev M. M., Butkevich A. V., Chudakov A. E., Mikheyev S. P., Suvorova O. V., Zakidyshev V. N.* Observation of Upward Through-Going Muons with the Baksan Detector: An Update // *Nucl. Phys.* 1999. V. 70. P. 371.
20. *Boliev M. M., Demidov S. V., Mikheyev S. P., Suvorova O. V.* Search for Muon Signal from Dark Matter Annihilations in the Sun with the Baksan Underground Scintillator Telescope for 24.12 Years // *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 2013. V. 09. P. 019.
21. *Petkov V. B., Boliev M. M., Alikhanov I. A., Butkevich A. V., Dzaparova I. M., Kochkarov M. M., Novoseltseva R. V., Volchenko V. I., Volchenko G. V., Yanin A. F.* The Search for High Energy Muon Neutrinos from Southern Hemisphere Gamma-Ray Bursts with BUST // *Phys. Part. Nucl.* 2015. V. 46, No. 2. P. 201.

22. Alexeenko V. V., Andreyev Yu. M., Chudakov A. E., Elensky Ya. S., Lidvansky A. S., Ozrokov S. Kh., Stenkin Yu. V., Tizengauzen V. A., Graham L. J., Osborne J. L., Wolfendale A. W. // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 1992. V. 18. P. L83.
23. Алексеев В. В., Лидванский А. С., Метлинский Н. А., Озроков С. Х., Скляр В. В., Тизенгаузен В. А., Хаердинов Н. С., Чудаков А. Е. // Письма в ЖЭТФ. 1986. Т. 44. С. 202.
24. Dzharripuev D. D., Petkov V. B., Lidvansky A. S., Volchenko V. I., Volchenko G. V., Gorbacheva E. A., Dzararova I. M., Klimenko N. F., Kudzhaev A. U., Kurenya A. N., Mikhailova O. I., Ptitsyna K. V., Khadzhev M. M., Yanin A. F. Search for Diffuse Cosmic Gamma Rays of Energy  $E_\gamma > 100$  TeV with the Carpet-3 Air Shower Array // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 798. P. 012028.
25. Смирнов Д. В., Петков В. Б., Карнов С. Н. Поиск всплесков космического гамма-излучения сверхвысокой энергии на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе // Письма в Астрон. журн. 2006. Т. 32, вып. 1. С. 3.
26. Petkov V. B., Pozanenko A. S., Loznikov V. M. Searching for GeV Energy from Short Gama-Ray Bursts // Proc. of Gamma Ray Bursts 2010 Conf., Annapolis, USA, Nov. 1–4, 2010. AIP Conf. Proc. 2011. V. 1358. P. 217.
27. Петков В. Б., Позаненко А. С., Лозников В. М., Гапоненко А. Н., Андреев М. В., Сергеев А. В. Поиск гамма-излучения высокой энергии от космических гамма-всплесков // Изв. РАН. Сер. физ. 2011. Т. 75, вып. 3. С. 463.
28. Petkov V. B., Pozanenko A. S., Loznikov V. M., Gaponenko A. N., Andreev M. V., Sergeev A. V. Search for High Energy Gamma-Ray Bursts // Astrophys. Space Sci. Trans. 2011. V. 7. P. 97.
29. Петков В. Б., Бугаев Э. В., Климай П. А., Андреев М. В., Волченко В. И., Волченко Г. В., Гапоненко А. Н., Гулиев Ж. Ш., Дзарарова И. М., Смирнов Д. В., Сергеев А. В., Черняев А. Б., Янин А. Ф. Поиск всплесков гамма-излучения сверхвысокой энергии от испаряющихся первичных черных дыр // Письма в Астрон. журн. 2008. Т. 34, вып. 8. С. 563.
30. Петков В. Б., Бугаев Э. В., Климай П. А., Андреев М. В., Волченко В. И., Волченко Г. В., Дзарарова И. М., Джаппуев Д. Д., Гапоненко А. Н., Гулиев Ж. Ш., Клименко Н. Ф., Куджаев А. У., Сергеев А. В., Хаердинов Н. С., Черняев А. Б., Янин А. Ф. Экспериментальный поиск всплесков гамма-излучения от испаряющихся первичных черных дыр // ЖЭТФ. 2010. Т. 137, вып. 3. С. 460.
31. Petkov V. B. Experimental Search for Evaporating Primordial Black Holes // Phys. Part. Nucl. 2015. V. 46, No. 2. P. 205.
32. Верешков Г. М., Петков В. Б. Поиск сверхкоротких всплесков гамма-излучения от испаряющихся первичных черных дыр // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 101, вып. 3. С. 160.
33. Барабанов И. Р. и др. (колл. БСДБО). Детектор большого объема в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН по изучению природных потоков нейтрино для целей гео- и астрофизики // ЯФ. 2017. Т. 80, вып. 3. С. 230.