

ОНИ БЫЛИ ПЕРВЫМИ (К 50-летию Баксанской нейтринной обсерватории)

*А. С. Лидванский**

Институт ядерных исследований РАН, Москва

Представлен краткий обзор некоторых экспериментов, выполненных на установках Баксанской нейтринной обсерватории за все время ее существования. Основное внимание уделено самым первым экспериментам и тем результатам, которые были наилучшими в мире хотя бы некоторое время (или остаются таковыми до сих пор).

A short review of some experiments carried out at the Baksan Neutrino Observatory during the entire time of its existence is given. The main emphasis is made on the results of the very first experiments made at Baksan and on those that were the world-best at least for a short period of time (or still remain as such until the present time).

PACS: 13.15.+g; 13.85.Tr; 14.60.-z; 14.80.Nv; 26.65.+t; 92.60.hx; 92.60.Pw; 95.85.Ry; 95.85.Pw

ВВЕДЕНИЕ

Те, кто еще способен вспомнить, что заголовок этой статьи воспроизводит название старого советского фильма о первых комсомольцах, могут подумать, что речь пойдет о людях, начинавших работы по созданию обсерватории, и о первых ее сотрудниках. Однако предмет данной публикации не люди (которые, конечно, заслуживают добрых слов и воспоминаний), а работы и результаты. В день юбилея интересно и важно подвести некоторый итог того, что было сделано, и здесь предлагается беглый взгляд на те баксанские эксперименты, к которым применимо слово «первый» в разных значениях. Во-первых, хронологически. Весьма уместно прежде всего напомнить о самых первых работах, которые были сделаны на Баксане и даже еще раньше при разработке установок и подготовке к экспериментам. Во-вторых, среди всех полученных результатов полезно выделить те, которые были на момент получения и/или опубликования первыми (лучшими) в мире (хотя бы

*E-mail: lidvansk@lebedev.ru

на короткое время). Наконец, из этих некогда лучших результатов можно выделить и те, которые до сих пор остаются лучшими. Они все были первыми, но некоторые остаются таковыми только в исторических записях и архивах, а другие могут занимать первые места и в современных рейтингах.

Сразу следует оговориться, что здесь рассматриваются не все баксанские эксперименты, а только те, которые так или иначе связаны с общим руководством А. Е. Чудакова и намеченной им программой исследований. Есть несколько причин для такого ограничения: 1) эти работы начались и соответствующие установки введены в строй раньше, чем остальные, 2) автор более знаком именно с ними, 3) на прошедших мероприятиях в честь столетия Г. Т. Зацепина много внимания было уделено тем работам, которые велись под его общим руководством, да и в других докладах настоящей конференции они будут отражены в достаточной мере. Но есть и одно дополнительное соображение, которое делает оправданным специальное внимание к рассматриваемой здесь группе экспериментов. А. Е. Чудаков с достойной сожаления небрежностью относился к публикации своих результатов и отчасти заразил таким отношением и своих сотрудников. Иногда он раскисал в этом впоследствии («к сожалению, мы этой вашей работе делали мало рекламы. . .»), но фактом является то, что значительная доля результатов, которые обсуждаются здесь, были «плохо» опубликованы: иногда только в трудах конференций, а иногда в недостаточно авторитетных (с точки зрения современной наукометрии и ее преданных адептов среди научных чиновников) журналах. Поэтому напомнить об этих результатах и собрать по возможности все доступные ссылки на них представляется весьма важной задачей.

1. ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЙ ПЕРИОД И ДОБАКСАНСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Когда стало ясно, что для новых установок будущей нейтринной обсерватории понадобится много сцинтиллятора, сотрудниками лаборатории «Нейтрино» ФИАН* был разработан очень дешевый жидкий сцинтиллятор на основе уайт-спирита [1]. Кроме дешевизны, важной при массовом производстве в количестве многих сотен тонн, сцинтиллятор обладал высокой прозрачностью и световыходом, а длительная эксплуатация на многих установках показала его исключительную долговечность при стабильности характеристик. Для калибровки и настройки детекторов, конструкция которых

*Строительство БНО начиналось еще до создания ИЯИ АН СССР в 1971 г. При переходе туда лаборатория «Нейтрино» ФИАН, которой заведовал Г. Т. Зацепин, была преобразована в Отдел лептонов высоких энергий и нейтринной астрофизики. А. Е. Чудаков возглавил в этом отделе Лабораторию лептонов высоких энергий.

разрабатывалась одновременно с созданием сцинтиллятора, было создано несколько самодельных приборов. В числе них, например, рентгеновский источник для засветки больших групп детекторов [2] и источник световых импульсов для измерения динамического диапазона фотоумножителей [3]. Кроме того, когда достаточное число детекторов было изготовлено, на Долгопрудненской станции ФИАН был создан небольшой мюонный телескоп из ста детекторов [4, 6]. Там же, пока не вошел в строй специально для этого построенный на БНО химцеx, проводилась очистка растворителя, подготовка сцинтиллятора и наполнение детекторов. Долгопрудненский телескоп служил в основном целям отработки методики и обучения персонала, и очень скоро все эти работы были перенесены на Кавказ, но все же некоторые научные результаты, полученные на этом телескопе, были опубликованы [5].

2. ПЕРВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА БАКСАНЕ. УСТАНОВКА «КОВЕР»

Первой научной работой, выполненной уже на Баксане, было опровержение так называемого Турин-эффекта. Группа итальянских ученых из Турина [7] измерила в туннеле под Монбланом количество останавливающихся мюонов. Для глубины 4500 м водного эквивалента измеренное значение превысило ожидаемое на порядок. Многие теоретики (например, Е. Л. Фейнберг) проявляли исключительный интерес к этому результату. В то время на месте будущей нейтринной станции (так она тогда называлась) не было еще ни одной установки и почти не было лабораторных помещений. Один стандартный детектор с наскоро созданной системой регистрации помещался в еще недостроенной штольне на разных расстояниях от входа. Результат этих измерений был сформулирован в работе [8] следующим образом: «В рамках традиционных представлений о взаимодействиях мюонов результат работы [1] (имеется в виду работа [7] из списка литературы. — А. С. Л.) не имеет простого объяснения». Так вежливо и элегантно было сообщено о закрытии Турин-эффекта.

Первой крупной установкой, созданной на Баксане, стала установка «Ковер» [9, 10]. Мотивация ее создания продолжала логику долгопрудненского телескопа: главная ее часть — ковер из 400 сцинтилляторов общей площадью 200 м², представляющий собой модель одной плоскости будущего подземного телескопа. Несмотря на такую прикладную цель ее создания, установка «Ковер» оказалась имеющим огромную самостоятельную ценность прибором для исследований в области физики космических лучей. Первоначально центральный сцинтилляционный ковер был окружен шестью выносными пунктами, имеющими по 18 типовых сцинтилляционных детекторов и набор счетчиков Гейгера для калибровки (в установке этих выносных пунктов и их оснащении принимала участие лаборатория Г. Б. Христиансена из НИИЯФ МГУ).

Впоследствии к этому первоначальному набору были добавлены нейтронный монитор и мюонный детектор. Установка несколько раз была модернизирована и находится в эксплуатации по сей день. Более того, в настоящее время на ее базе реализуется проект «Ковер-3»: показано, что при радикальном увеличении площади мюонного детектора, благодаря селекции бедных мюонами ливней, установка может обладать наилучшей в мире чувствительностью к первичному гамма-излучению с энергией в диапазоне 10–100 ТэВ [11].

Самые первые эксперименты на установке «Ковер» были связаны с исследованием функции пространственного распределения (ФПР) частиц. Благодаря большой непрерывной площади при мелкой структуре ось ливня локализовалась с хорошей точностью, а выносные детекторы большой площади очень точно меряли плотность частиц. Эти два фактора позволяли проводить поистине прецизионные измерения ФПР, хотя и в ограниченном диапазоне расстояний от оси ливня [12, 13]. Эта же беспрецедентная точность позволила обнаружить аномальные ливни с резкими флуктуациями ФПР [14]. Далее, большая площадь «Ковра» позволила детально изучать пространственную структуру ШАЛ вблизи оси [15] и исследовать многоствольные ливни [16, 17]. Интерпретируя подстволы в многоствольных ливнях как результат генерации лидирующими частицами струй с большими поперечными импульсами, удалось получить сечение генерации таких струй при энергии, эффективное значение которой было оценено как 500 ГэВ в системе центра масс. К тому времени уже существовали расчеты этого процесса в рамках квантовой хромодинамики для 540 ГэВ — энергии строившегося тогда SPS-коллайдера. В работе [18] было показано, что сечение генерации струй с большими поперечными импульсами, извлеченное из анализа многоствольных ШАЛ на установке «Ковер», находится в хорошем согласии с предсказаниями квантовой хромодинамики. Когда в ЦЕРН вошел в строй SPS-коллайдер, аналогичный результат был получен коллаборациями UA1 и UA2, но это было сделано на полтора года позже. О других результатах установки «Ковер» будет сказано несколько позже.

3. БПСТ И ЕГО ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Планируя строительство нейтринной станции, инициаторы ее создания (М. А. Марков и Б. М. Понтекоров) и руководители работ (Г. Т. Зацепин и А. Е. Чудаков) имели в виду два основных направления: измерение потока нейтрино низких энергий от Солнца и регистрацию нейтрино высоких энергий от взаимодействий космических лучей в атмосфере. Первое направление вылилось в итоге в создание галлий-германиевого нейтринного телескопа (ГНТ), хотя обсуждались и хлор-аргонный и литиевый детекторы. Для атмосферных нейтрино с самого начала был запланирован Баксанский подземный

сцинтилляционный телескоп [19, 20]. Заметим, однако, что даже в его устоявшемся названии не фигурировало слово «нейтрино». Этим (может быть неосознанно) подчеркивалась многозадачность установки. До создания БПСТ в мире были выполнены два эксперимента с регистрацией атмосферных нейтрино, в Индии и Южной Африке. Оба проводились на очень большой глубине (для снижения фона от мюонов космических лучей) в шахтах, можно сказать, условно естественного (промышленного) происхождения*. И оба регистрировали горизонтальный поток атмосферных нейтрино. Установки БНО были первыми в мире, для которых строились специальные подземные помещения. При этом БПСТ был нацелен на регистрацию вертикальных (прошедших сквозь весь земной шар) нейтрино и запроектирован на такой глубине, где мюонный фон сверху превышал искомый нейтринный сигнал в 10^7 раз. Это чрезвычайно осложнило задачу выделения нейтринного сигнала, но зато позволило решать одновременно множество задач, связанных с мюонами (измерение потока мюонов и его вариаций, исследование взаимодействий мюонов и групп мюонов и т. д.). Таким образом, БПСТ можно считать первым прибором так называемой подземной физики.

Задача селекции нейтринных событий из на много порядков превосходящего их по интенсивности мюонного фона была успешно решена с помощью времяпролетной методики, и первое вертикальное нейтрино «от антиподов» было зарегистрировано 14 декабря 1978 г. в 08:31:10 по местному времени. Несмотря на малый темп счета нейтринных событий, статистика, позволявшая сделать оценки параметров осциллирующей нейтрино, была накоплена довольно быстро [21, 22]. Отношение измеренных и ожидаемых величин потока $R = 0,95 \pm 0,22$ позволило на 90%-м доверительном уровне получить оценку для разности квадратов масс $\Delta m^2 \sim 6 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2$ (для двух типов нейтрино и максимального угла смешивания). Этот предел улучшил существовавшее на тот момент значение сразу в сто раз. Конечно, он продержался в качестве лучшего недолго, как и предел на время жизни протона [23]. Здесь следует сказать, что принцип многозадачности и универсальность конструкции БПСТ позволили успешно решать задачи, которых просто не было при разработке и создании телескопа. К ним относится и проблема стабильности нуклона, возникшая в контексте моделей великого объединения. Для проведения этого эксперимента на телескопе были сделаны некоторые конструктивные изменения для улучшения антисовпадательной защиты внутренних слоев. Нижний предел на время жизни протона, полученный в работе [23], составил $1,25 \cdot 10^{30}$ лет (на 90%-м доверительном уровне) для всех безнейтринных мод распада. Этот результат пробыл лучшим в мире в течение примерно полугода.

*Первый эксперимент Р. Дэвиса по солнечным нейтрино был также выполнен в шахте, хотя, конечно, из-за масштабов установки горную выработку пришлось увеличить.

Совсем иная ситуация сложилась с другим пределом — на поток магнитных монополей. Теоретические работы о сверхтяжелом магнитном монополе появились в начале 1980-х гг., и БПСТ оказался самым подходящим в мире прибором для его поиска. Первый результат был опубликован в 1983 г. [24]. Он оставался лучшим еще и в 1988 г., когда американо-итальянская коллаборация MACRO запустила в национальной лаборатории Гран-Сассо гигантскую установку, основной целью которой было «наблюдать магнитный монополь или установить значительно более низкий (по сравнению с имеющимися значениями) экспериментальный предел на его поток в диапазоне скоростей от примерно $\beta = 10^{-4}$ до единицы» [25]. Значительно более низкого предела у этой коллаборации не получилось. Когда установка MACRO завершила работу в 2000 г., она сумела лишь достигнуть предела БПСТ (чуть-чуть превзойдя его при некоторых скоростях монополя) [26]. Таким образом, этот результат БПСТ оставался лучшим в мире в течение почти 20 лет! Редчайший случай в современной науке.

Среди достижений в исследовании мюонов следует отметить исследование неупругих взаимодействий мюонов и определение сечений фотоядерных взаимодействий [27, 28], исследование групп мюонов и оценку на основе этих данных массового состава первичных космических лучей [29, 30] и измерение энергетического спектра мюонов [31, 32]. Последнее делалось разными методами, но в этих исследованиях хочется особенно отметить попытку применения метода парметра [32], сделанную в сотрудничестве с сотрудниками МИФИ. Для полноценного парметра БПСТ имеет слишком малое число слоев, поэтому полученные в работе [32] данные для энергии более 10^5 ГэВ имеют большие ошибки, но дело в том, что других данных о спектре мюонов в этой области просто нет.

При этом БПСТ все же является нейтринным детектором, причем не только для атмосферных нейтрино. Поиск нейтрино от коллапса при взрыве сверхновой является одной из задач нейтринной астрономии, и эта программа увенчалась значительным успехом, когда БПСТ оказался в числе четырех детекторов, зарегистрировавших сигнал от сверхновой SN1987A в Большом Магеллановом Облаке [33]. Кроме БПСТ, это были еще LSD под Монбланом в Италии, IMB в США и Камиоканде в Японии.

4. РАСШИРЕНИЕ ТЕМАТИКИ И НОВЫЕ УСТАНОВКИ БНО

Нейтринные и подземные исследования, успешно начатые на установке «Ковер» еще до запуска БПСТ, не только продолжались, но и расширялись после запуска и БПСТ (1977 г.), и ГНТ (1983 г.). Еще в конце 1970-х гг. на «Ковре» наблюдались так называемые метеоэффекты — значительные вариации темпа счета во время грозы и дождя. Такие явления наблюдались и ранее, но интерпретировались как вызванные резкими изме-

нениями давления, скорости ветра и температуры. По инициативе Чудакова В. Г. Сборщиком были начаты измерения приземного электрического поля, и в серии пионерских экспериментов было доказано влияние электрического поля атмосферы во время гроз на интенсивность космических лучей [34]. После ранней смерти Сборщикова эти эксперименты были прерваны, но возобновлены в 2000 г. [35] на новом уровне. Эксперимент продолжается до сих пор, и в обзорном докладе [36] суммированы некоторые результаты этого эксперимента, которые указывают на сразу несколько новых физических эффектов, связанных с динамикой космических лучей в грозовой атмосфере.

В 1980-х гг. настало время гамма-астрономии. Очевидно неверная, как выяснилось впоследствии, работа кильской группы, якобы наблюдавшей сигнал от рентгеновского источника Лебедь X-3 при энергии ШАЛ выше 10^{15} эВ, породила целый вал работ, экспериментальных и теоретических, по гамма-астрономии ультравысоких энергий. Установка «Ковер» также поучаствовала в этой кампании [37]. Однако в целом шумная кампания окончилась фактически ничем, пожалуй, только с одним исключением. В работе [38] баксанской группой было объявлено о возможной вспышке в Крабовидной туманности 23 февраля 1989 г. при энергии 100 ТэВ. Публикация группы KGF из Индии [39] подтвердила эти данные, а в итоговой публикации [40] были приведены данные еще двух установок, Тянь-шаньской и EAS-TOP в Италии, которые, хотя и с небольшой значимостью, также подтвердили наличие эффекта. Результаты работы [40] были восприняты с понятным недоверием: слишком большой экзотикой казалась тогда вспышка излучения огромной энергии (сотни ТэВ) от источника, который хотя и был только что зарегистрирован черенковскими телескопами в ТэВ-ной области энергии, но был образцом стабильности (настолько, что долгие годы считался «стандартной свечой» в астрономии очень высоких энергий). Однако много лет спустя вспышки от Крабовидной туманности все же были зарегистрированы спутниковыми гамма-телескопами AGILE и FermiLAT при энергии в сотни МэВ. При этом, как было показано в работе [42], одна из вспышек AGILE [41] имела временную структуру, полностью аналогичную структуре вспышки 23 февраля 1989 г. (с учетом единого масштабного фактора). Это заставляет со всей серьезностью отнестись к последней: в конце концов, это сигнал от небесного источника при энергии, которая пока является рекордной для гамма-астрономии.

Большая площадь установок означает большой темп счета событий, что позволяет изучать вариации космических лучей с хорошей статистической точностью. По измерениям суточной волны интенсивности в звездном времени анизотропия космических лучей была измерена на трех установках БНО при трех разных энергиях: БПСТ (2,5 ТэВ), «Ковер» (10 ТэВ) и «Андырчи» (100 ТэВ) [43, 44]. В работе [45] на основании данных двух из этих установок было восстановлено истинное направление вектора анизотропии КЛ.

Установка для регистрации ШАЛ «Андырчи» [46] была создана в 1993 г. и расположена на склоне горы непосредственно над БПСТ (расстояние по вертикали между центрами установок 300 м). Это не единственная установка, которая пополнила первоначальный экспериментальный набор БНО. Рядом с установкой «Ковер» был установлен нейтронный монитор и построена первая очередь мюонного детектора площадью 175 м². В настоящее время этот мюонный детектор достраивается до площади 400 м² с перспективой увеличения в ближайшие годы до 600 м². На окраине Нальчика, на расстоянии 75 км от БНО установлена видеочамера для наблюдений со стороны свечения ночного неба высоко в атмосфере над областью грозы, идущей над БНО (расширение возможностей эксперимента по изучению грозových явлений и эффектов в космических лучах, связанных с ними). Все эти дополнения к первоначальному набору установок окажутся незначительными, если удастся реализовать очень крупные проекты, предлагаемые в настоящее время. Это эксперимент в области нейтринной физики БЕСТ, планируемый в зале ГНТ, и проект Большого низкофонового подземного сцинтилляционного детектора (БНПСД) для регистрации так называемых геонейтрино. Оба эксперимента требуют вложения очень больших средств, и пока перспективы их реализации неясны. Но на имеющихся установках исследования успешно продолжают.

Уже в конце 1990-х гг. в мире возник большой интерес к проблеме темной материи. И вновь оказалось, что БПСТ, при создании которого вовсе не планировалась такая перспектива, является здесь вполне конкурентоспособным детектором [47]. В работе [48] были получены ограничения на скорость аннигиляции нейтралино (гипотетической частицы холодной темной материи) в недрах Солнца и Земли. В настоящее время оценки сечения рассеяния частиц темной материи (WIMP) на протоне, сделанные на основе данных БПСТ, находятся на уровне лучших пределов, полученных другими установками [49].

5. ИТОГИ. БНО КАК НАУЧНЫЙ ЦЕНТР С ШИРОЧАЙШИМ ДИАПАЗОНОМ ИССЛЕДОВАНИЙ

Итак, какие же результаты из вышеперечисленных останутся в числе первых? Это прежде всего те, которые принадлежат истории. В порядке хронологии: первое экспериментальное подтверждение квантовой хромодинамики [18], первая регистрация вертикальных (прошедших через земной шар) нейтрино [21], первая регистрация нейтрино от коллапса при взрыве сверхновой (SN1987A) [33], первая регистрация вспышки гамма-излучения с энергией в сотни ТэВ от небесного объекта (Крабовидной туманности) [40]. Среди тех результатов, которые были лучшими ограниченное время, нужно особенно выделить результат-долгожитель — лучший в мире предел на поток

магнитных монополей [26]. Наконец, в качестве лучших результатов и в настоящее время, пожалуй, следует назвать вариации интенсивности вторичных космических лучей во время гроз [36]. Корреляционные кривые для мягкой компоненты [50] и мюонов в зависимости от приземного электростатического поля не только никто больше пока не смог измерить, но даже и не пытался это сделать. И вовсе не потому, что это «неуловимый Джо», который никому не нужен. Напротив, только измерение этих ожидаемых (скорее, даже неизбежных), но малых эффектов может дать исследователю уверенность, что он правильно все меряет и умеет корректно исключать наводки. Кроме того, со сделанными выше оговорками к наилучшим по сей день результатам можно отнести спектры мюонов при сверхвысоких энергиях [32].

Можно повторить еще раз уже сказанное в начале статьи: здесь сделан весьма краткий (и довольно субъективный) обзор только части экспериментов, выполненных за 50 лет на Баксане. К этому надо добавить еще результаты, полученные коллаборацией SAGE (Soviet–American Gallium Experiment) с помощью ГГНТ — одной из двух, наряду с GALLEX в Италии, галлий-германиевых установок для регистрации солнечных нейтрино. Очень значительную роль в научной программе БНО играют низкофоновые исследования. Первоначально была создана одна низкофоновая камера на расстоянии 400 м от входа в штольню. В настоящее время функционируют три низкофоновые лаборатории, одна из которых находится на расстоянии 3700 м от входа. Возможности БНО для исследования особо чистых низкорadioактивных материалов и проведения экспериментов, требующих максимального снижения фона космических лучей и естественной радиоактивности, поистине уникальны.

К установкам ИЯИ РАН надо добавить еще «гостевые». Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта имеет в подземельях БНО две геофизические лаборатории (на расстояниях 1500 и 4000 м), оснащенные высокоточными магнитовариационными станциями, наклономерами и другими приборами. ГАИШ им. П. К. Штернберга принадлежит Баксанский лазерный интерферометр-деформограф и находящийся в стадии отладки детектор гравитационных волн ОГРАН. Таким образом, БНО ИЯИ РАН является в настоящее время не просто нейтринной обсерваторией. Это уникальный научный центр с широчайшим диапазоном исследований — от геологии до астрономии и от физики элементарных частиц до материаловедения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воеводский А. В., Дадькин В. Л., Ряжская О. Г. Жидкие сцинтилляторы // Космические лучи: Сб. ст. 1969. № 11. С. 188–191; Жидкие сцинтилляторы для больших сцинтилляционных счетчиков // ПТЭ. 1970. № 1. С. 85–87.

2. Коновалов Ю. Н., Чудаков А. Е., Шелков Г. А. Портативный импульсный источник рентгеновского излучения для калибровки сцинтилляционных детекторов // Тр. ВККЛ. Ташкент, 1968. С. 133–136.
3. Еленский Я. С. Источник наносекундных световых импульсов большой интенсивности // ПТЭ. 1971. № 4. С. 183–184.
4. *Aleksejev E. N., Bakatanov V. N., Dadykin V. L., Kozuyarivsky V. A., Konovalov Yu. N., Mikheev S. P., Maslov V. N., Stepanov V. J.* 100-Channel Scintillation Telescope // 12th ICRC. Hobart, Tasmania, 1971. V. 6. P. 2516.
5. Сборщиков В. Г. Поиски короткопериодических вариаций космических лучей на широте Москвы // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1973. Т. 37, № 6. С. 1331–1333.
6. Алексеев Е. Н., Бакатанов В. Н., Воеводский А. В., Дадыкин В. Л., Козьярский В. А., Коновалов Ю. Н., Маслов В. Н., Михеев С. П., Степанов В. И. 100-канальный сцинтилляционный телескоп // Космические лучи: Сб. ст. 1974. № 14. С. 187–189.
7. *Baschiera B., Bergamasco L., Castagnoli C., Picchi P.* Experimental Results on Muons Stopping Underground (60–4500 m w. e.) // Lett. Nuovo Cim. 1970. V. 4. P. 121.
8. Алексеев Е. Н., Гуренцов В. Н., Михеев С. П., Тизенгаузен В. А., Чудаков А. Е. Интенсивность останавливающихся мюонов на глубине 60 и 850 м в. э. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1973. Т. 37, № 7. С. 1488–1492.
9. Алексеев Е. Н., Алексеенко В. В., Воеводский А. В., Глемба П. Я., Дадыкин В. Л., Догужаев В. А., Кузнецов В. А., Лидванский А. С., Марков В. Я., Марков Ю. Я., Сборщиков В. Г., Степанов В. И., Парамонов В. И., Поманский А. А., Татьяна Б. Б., Тизенгаузен В. А., Христиансен Г. Б., Цябук А. Л., Чудаков А. Е. Сцинтилляционный детектор площадью 200 м² для регистрации космических лучей // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1974. Т. 38, № 5. С. 1097–1100.
10. Алексеев Е. Н., Глемба П. Я., Лидванский А. С., Марков В. Я., Молчанова Н. И., Татьяна Б. Б., Тизенгаузен В. А., Чудаков А. Е., Куликов Г. В., Сулаков В. П., Христиансен Г. Б. Установка для изучения центральной части ШАЛ при помощи сцинтилляционного детектора площадью 200 м² // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1976. Т. 40, № 5. С. 994–997.
11. Джанпуев Д. Д., Петков В. Б., Лидванский А. С., Волченко В. И., Горбачева Е. А., Дзапарова И. М., Куджаев А. У., Клименко Н. Ф., Куреня А. Н., Михайлова О. И., Птицына К. В., Хаджиев М. М., Янин А. Ф. Эксперимент «Ковер-3» — поиск диффузного гамма-излучения с энергией свыше 100 ТэВ // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81, № 4. С. 461–464.
12. *Alexeyev E. N., Chudakov A. E., Danshin A. E., Galperin M. D., Glemba P. Ya., Lidvansky A. S., Sulla-Petrovsky Yu. R., Nanian B. V., Tizengausen V. A., Khristiansen G. B., Kulikov G. V., Sulakov V. P.* Lateral Distribution of Electrons in EAS with $N_e \geq 2 \cdot 10^5$ // 15th ICRC. Plovdiv, 1977. V. 8. P. 52.
13. Алексеев Е. Н., Гальперин М. Д., Глемба П. Я., Данишин А. Е., Лидванский А. С., Сулла-Петровский Ю. Р., Татьяна Б. Б., Тизенгаузен В. А., Чудаков А. Е., Куликов Г. В., Сулаков В. П., Христиансен Г. Б. Функция пространственного распределения электронов в ШАЛ на высоте 1700 м над уровнем моря // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1978. Т. 42, № 7. С. 1417–1419.

14. Джарпуев Д. Д., Лидванский А. С., Тизенгаузен В. А., Чудаков А. Е., Сулаков В. П., Христиансен Г. Б. Флуктуации формы пространственного распределения ШАЛ на расстояниях < 50 м от оси // ЯФ. 1979. Т. 29, № 4. С. 957–961.
15. Алексеев Е. Н., Гальперин М. Д., Глемба П. Я., Джарпуев Д. Д., Лидванский А. С., Сулла-Петровский Ю. Р., Татьяна Б. Б., Тизенгаузен В. А., Чудаков А. Е., Куликов Г. В., Сулаков В. П., Христиансен Г. Б., Наварра Дж. Пространственная структура ШАЛ вблизи оси // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1978. Т. 42, № 7. С. 1240–1242.
16. Chudakov A. E., Dzharpuyev D. D., Lidvansky A. S., Tizengauzen V. A., Sulakov V. P., Navarra G. Investigation of EAS with Multicore Structure // 16th ICRC. Kyoto, Japan, 1979. V. 8. P. 222.
17. Джарпуев Д. Д., Лидванский А. С., Наварра Дж., Сулаков В. П., Тизенгаузен В. А., Чудаков А. Е. Многоствольные широкие атмосферные ливни и события с большими поперечными импульсами // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1981. Т. 45, № 7. С. 1417–1419.
18. Chudakov A. E., Dobrzynski K., Krys E., Lidvansky A. S., Navarra G., Tizengauzen V. A., Wdowczyk J. The Data on Multicore Air Showers and Cross-Section of High- p_T Jet Production at $\sqrt{s} \sim 500$ GeV // Proc. of the 17th ICRC. Paris, 1981. V. 6. P. 183–186.
19. Алексеев Е. Н., Алексеенко В. В., Андреев Ю. М., Бакатанов В. Н., Буткевич А. В., Воеводский А. В., Волченко В. И., Гальперин М. Д., Гительсон А. А., Гуренцов В. И., Дадыкин В. Л., Догужаев В. А., Еленский Я. С., Закидышев В. Н., Козьяривский В. А., Когай И. М., Клименко Н. Ф., Кирюшин А. А., Коновалов Ю. Н., Марков В. Я., Марков Ю. Я., Метлинский Н. А., Маловичко Ю. В., Михеев С. П., Михелев А. Р., Новосельцев Ю. С., Сборщиков В. Г., Стенькин Ю. В., Степанов В. И., Скляр В. В., Сулла-Петровский Ю. Р., Тулупова Т. И., Чудаков А. Е. Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1980. Т. 44, № 3, С. 609–612.
20. Михеев С. П., Чудаков А. Е. Подземный сцинтилляционный телескоп // Земля и Вселенная. 1979. № 1. С. 4–9.
21. Болиев М. М., Буткевич А. В., Закидышев В. Н., Макоев Б. А., Михеев С. П., Чудаков А. Е. Ограничения на параметры осцилляций нейтрино по данным Баксанского подземного телескопа // ЯФ. 1981. Т. 34, № 5(11). С. 1418–1421.
22. Boliev M. M., Butkevich A. V., Chudakov A. E., Makoev B. A., Mikheyev S. P., Zakidyshv V. N. Baksan Neutrino Experiment // Proc. of Neutrino'81 Conf. Honolulu, Hawaii, 1981. V. 1. P. 283–290.
23. Алексеев Е. Н., Бакатанов В. Н., Буткевич А. В., Воеводский А. В., Гительсон А. А., Данишин А. Е., Кейдан Г. П., Кирюшин А. А., Петкова О. И., Чудаков А. Е., Штерн Б. Е. Ограничение на время жизни протона по данным Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа // Письма в ЖЭТФ. 1981. Т. 33, № 12. С. 664–667.
24. Alexeyev E. N., Boliev M. M., Chudakov A. E., Mikheev S. P., Shkvorets O. Yu. Search for Slowly Moving Penetrating Particles at Baksan Underground Telescope // 18th ICRC. Bangalore, India, 1983. V. 5. P. 52–55.
25. Ambrosio M., Antolini R., Assiro R., Auriemma G., Bakari D., Baldini A., Barbarino G. C., Barbarito E., Barish C., Battistoni G., Becherini Y., Belotti R., Bemporad C.,

- Bilokon H., Bisi V., Bloise C., Bottazzi E., ... Zaccheo N.* The MACRO Detector at Gran Sasso // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 486, Iss. 3. P. 663–707.
26. *Болиев М. М., Михеев С. П., Чудаков А. Е.* Поиск магнитных монополей на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе // Изв. РАН. Сер. физ. 2001. Т. 65, № 11. С. 1662–1663.
 27. *Бакатанов В. Н., Новосельцев Ю. Ф., Новосельцева Р. В., Семенов А. М., Стенькин Ю. В., Чудаков А. Е.* Сечение фотоядерного взаимодействия при энергии фотонов в диапазоне от 0,9 до 10 ТэВ // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 48. С. 121–123.
 28. *Верешков Г. М., Лалакулич О. Д., Новосельцев Ю. Ф., Новосельцева Р. В.* Полное сечение $\gamma - N$ взаимодействия в области энергий $\sqrt{s} = 40\text{--}250$ ГэВ // ЯФ. 2003. Т. 66, № 3. С. 591–600.
 29. *Bakatanov V. N., Novosel'tsev Yu. F., Novosel'tseva R. V.* Observation of “the Knee” in Cosmic-Ray Energy Spectrum with Underground Muons and the Primary Mass Composition in the Range $10^{15}\text{--}10^{17}$ eV // Astropart. Phys. 1999. V. 12. P. 19.
 30. *Novoseltsev Y. F., Novoseltseva R. V., Vereshkov G. M.* On the Mass Composition of Primary Cosmic Rays in the Energy Region $10^{15}\text{--}10^{16}$ eV // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2012. V. 39. 105202.
 31. *Bakatanov V. N., Chudakov A. E., Novosel'tsev Yu. F., Novosel'tseva R. V., Semenov A. M., Sten'kin Yu. V.* Study of Muon Spectrum and Muon Inelastic Scattering at Baksan Underground Scintillation Telescope // Proc. of the 21st ICRC. Adelaide, 1990. V. 9. P. 375–378.
 32. *Bogdanov A. G., Kokoulin R. P., Novoseltsev Yu. F., Novoseltseva R. V., Petkov V. B., Petrukhin A. A.* Energy Spectrum of Cosmic-Ray Muons in 100 TeV Energy Region Reconstructed from the BUST Data // Astropart. Phys. 2012. V. 36. P. 224–236.
 33. *Alexeev E. N., Alexeeva L. N., Krivosheina I. V., Volchenko V. I.* Detection of the Neutrino Signal from SN1987A in the LMC Using the INR Baksan Underground Scintillation Telescope // Phys. Lett. B. 1988. V. 205. P. 209–214.
 34. *Alexeyenko V. V., Chudakov A. E., Sborshikov V. G., Tizengauzen V. A.* Short Perturbations of Cosmic-Ray Intensity and Electric Field in Atmosphere // Proc. of the 19th ICRC. La Jolla, 1985. V. 5. P. 352–355.
 35. *Alexeenko V. V., Khaerdinov N. S., Lidvansky A. S., Petkov V. B.* Transient Variations of Secondary Cosmic Rays Due to Atmospheric Electric Field and Evidence for Pre-Lightning Particle Acceleration // Phys. Lett. A. 2002. V. 301, Iss. 3–4. P. 299–306.
 36. *Lidvansky A. S., Khaerdinov N. S.* The Baksan Experiment on Thunderstorm CR Variations: History, Results and Prospects // Proc. of Intern. Symp. “Thunderstorm Elementary Particle Acceleration” (TEPA 2015), Nor Amberd, Armenia, Oct. 5–9, 2015 / Ed. by A. Chilingarian. Yerevan, 2016. P. 35–40.
 37. *Alexeenko V. V., Chudakov A. E., Elensky Ya. S., Khaerdinov N. S., Lidvansky A. S., Metlinsky N. I., Ozrokov S. Kh., Sklayrov V. V., Tizengauzen V. A.* Cygnus X-3 Observation in Gamma-Ray Energy Range 10^{14} eV // Nuovo Cim. 1987. V. 10C. P. 151–161.
 38. *Alexeenko V. V., Lidvansky A. S., Tizengauzen V. A.* A Search for $> 10^{14}$ eV Gamma Rays from Point Sources at Baksan Air Shower Array // Proc. of Intern. Workshop on Very High Energy Gamma Ray Astronomy. Crimea, 1989 / Ed. by A. A. Stepanyan, D. J. Fegan, and M. F. Cawley. P. 137.

39. Acharya B. S., Rao M. V. S., Sivaprasad K., Sreekantan B. V., Vishwanath P. R. First Simultaneous Detection of PeV Energy Burst from the Crab Nebula // *Nature*. 1990. V. 347. P. 364-5.
40. 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. The Ultra-High Energy Gamma-Ray Burst from the Crab Nebula Observed by the Baksan EAS Array // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 1992. V. 18. P. L83-L88.
41. Striani E., Tavani M., Vittorini V., Donnarumma I., Giuliani A., Pucella G., Argan A., Bulgarelli A., Colafrancesco S., Cardillo M., Costa E., Del Monte E., Ferrari A., Mereghetti S., Pacciani L., ... Verrecchia F. Variable Gamma-Ray Emission from the Crab Nebula: Short Flares and Long «Waves» // *Astrophys. J.* 2013. V. 765. P. 52.
42. Лидванский А. С. О вспышечной активности Крабовидной туманности, зарегистрированной установками для изучения ШАЛ // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2013. Т. 77, № 11. С. 1617-1619.
43. Алексеев В. В., Гулиева Е. Н., Сборщиков В. Г., Чудаков А. Е. Анизотропия малых атмосферных ливней ($E_0 \sim 10^{13}$ эВ) // *Изв. РАН. Сер. физ.* 1982. Т. 46, № 9. С. 1726-1728.
44. Козяревский В. А., Лидванский А. С., Петков В. Б., Тулупова Т. И. Среднесуточные вариации интенсивности космических лучей по измерениям на установках Андырчи ($E \geq 100$ ТэВ) и БПСТ ($E \geq 2,5$ ТэВ) // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2004. Т. 68, № 11. С. 1596-1598.
45. Джанпуев Д. Д., Козяревский В. А., Куджаев А. У., Лидванский А. С., Тулупова Т. И. Восстановление направления истинной анизотропии галактических космических лучей // *Письма в Астрон. журн.* 2010. Т. 36, № 6. С. 439-444.
46. Алексеев Е. Н., Алексеев В. В., Бакаганов В. Н., Бозиев С. Н., Воеводский А. В., Волченко В. И., Гуренцов В. И., Дударевич А., Карпов С. Н., Коновалов Ю. Н., Клименко Н. Ф., Короткий Г. Д., Козяревский В. А., Маловичко Ю. В., Марчук Д. Л., ... Янин А. Ф. Установка «Андырчи» для регистрации ШАЛ над Баксанским подземным сцинтилляционным телескопом // *Изв. РАН. Сер. физ.* 1993. Т. 57, № 4. С. 99-102.
47. Boliev M. M., Bugaev E. V., Butkevich A. V., Chudakov A. E., Mikheev S. P., Suvorova O. V., Zakidyshev V. N. Search for Supersymmetric Dark Matter with Baksan Underground Telescope // *Nucl. Phys. B. Proc. Suppl.* 1996. V. 48. P. 83-86.
48. 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. 19.
49. Suvorova O. V. Status of Indirect Dark Matter Search with Neutrino Telescopes // *Phys. Part. Nucl.* 2016. V. 47, No. 6. P. 938-946.
50. Khaerdinov N. S., Lidvansky A. S., Petkov V. B. Electric Field of Thunderclouds and Cosmic Rays: Evidence for Acceleration of Particles (Runaway Electrons) // *Atmospheric Res.* 2005. V. 76, Iss. 1-4. P. 346-354.