

КОМПЛЕКСНАЯ ЛИВНЕВАЯ УСТАНОВКА «КОВЕР-3» БАКСАНСКОЙ НЕЙТРИННОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ИЯИ РАН

*Д. Д. Джаппуев, В. И. Волченко, Г. В. Волченко, Е. А. Горбачева,
И. М. Дзапарова, А. У. Куджаев*, А. Н. Куреня, Н. Ф. Клименко,
А. С. Лидванский, О. И. Михайлова, В. Б. Петков,
М. М. Хаджиев, А. Ф. Янин*

Институт ядерных исследований РАН, Москва

В настоящее время в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН идет подготовка эксперимента по измерению потока космических гамма-квантов с энергией выше 100 ТэВ. Для этого на базе проработавшей много лет ливневой установки «Ковер-2» создается комплексная ливневая установка «Ковер-3». Подготовка эксперимента предполагает в том числе увеличение площади мюонного детектора (МД) и наземной части установки. Для наземных модулей установки «Ковер-3» разработан сцинтилляционный детектор с жидкостным сцинтиллятором в пластиковых упаковках. В работе приводятся описание установки «Ковер-3» и рабочие характеристики нового сцинтилляционного детектора.

An experiment for measuring the flux of gamma rays with energy above 100 TeV is currently being prepared at the Baksan Neutrino Observatory INR of RAS. For this purpose, on the basis of the Carpet-2 shower array with many years experience, the Carpet-3 multipurpose shower array is being created. The preparing of the experiment includes increasing the area of muon detector (MD) and the ground part of the array. For ground modules of Carpet-3 array, a scintillation detector with liquid scintillator in plastic wrappings is elaborated. In this work the description of Carpet-3 array and working characteristics of the new scintillation detector are presented.

PACS: 98.70.Rz; 83.85.-c

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к поиску первичного гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ заметно возрос в последнее время в связи с результатами эксперимента Ice-Cube, в котором были зарегистрированы высокоэнергетические нейтрино

*E-mail: Kudjaev@mail.ru

астрофизического происхождения. В работе [1] показано, что если эти нейтрино являются результатом распадов заряженных пионов в Галактике, то должны существовать и нейтральные пионы с теми же энергиями, распад которых дает заметный поток космического гамма-излучения в диапазоне энергий 10^{14} – $5 \cdot 10^{17}$ эВ. Регистрация космического гамма-излучения при таких энергиях возможна только в экспериментах по регистрации широких атмосферных ливней космических лучей (ШАЛ), в которых можно отделить ливни, рожденные первичными фотонами, от ливней, рожденных первичными протонами и ядрами. Такое разделение возможно вследствие того, что ливни от первичных фотонов существенно обеднены адронами (и, как следствие, мюонами) по сравнению с ливнями от первичных протонов, тем более ядер. Таким образом, если отбирать ШАЛ, обедненные адронами и мюонами, то можно достаточно эффективно выделять ливни от первичных гамма-квантов. Создаваемая в настоящее время в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН комплексная ливневая установка «Ковер-3» уже имеет мюонный детектор площадью 410 м^2 , и есть возможность увеличения его площади до 615 м^2 . Для увеличения площади регистрации осей ШАЛ будут дополнительно установлены наземные модули сцинтилляционных счетчиков. Предварительные оценки показывают, что новая установка будет иметь наилучшую чувствительность к потоку первичных гамма-квантов с энергиями в диапазоне $100 \text{ ТэВ} - 1 \text{ ПэВ}$.

УСТАНОВКА «КОВЕР-2»

Установка «Ковер-2» (рис. 1) предназначена для исследования мюонной и адронной компонент ШАЛ. Она состоит из центральной части («Ковер») [2, 3], содержащей 400 жидкостных сцинтилляционных детекторов размером $0,7 \times 0,7 \times 0,3 \text{ м}$ каждый, расположенных в виде сплошного квадрата со стороной 14 м и общей площадью 196 м^2 .

Диапазон измерения энерговыделений в индивидуальном жидкостном детекторе равен 10 – 5000 релятивистских частиц (р.ч.), где 1 р.ч. — наиболее вероятное энерговыделение ($\sim 50 \text{ МэВ}$) одиночных частиц космических лучей. Вокруг центральной установки расположены шесть выносных пунктов (ВП), предназначенных для определения направления прихода ливней. Четыре из них расположены на расстоянии 30 м и образуют квадратную геометрию, а два других — на расстоянии 40 м от геометрического центра «Ковра». Каждый из ВП имеет размер $2,1 \times 4,2 \text{ м}$ и содержит по 18 жидкостных сцинтилляционных детекторов, аналогичных тем, которые используются в «Ковре». Для опроса и записи информации на установке используются триггеры М1 и М2. Триггер М1 создается при совпадении импульсов четырех ВП, расположенных на расстоянии 30 м от центра «Ковра» с импульсом

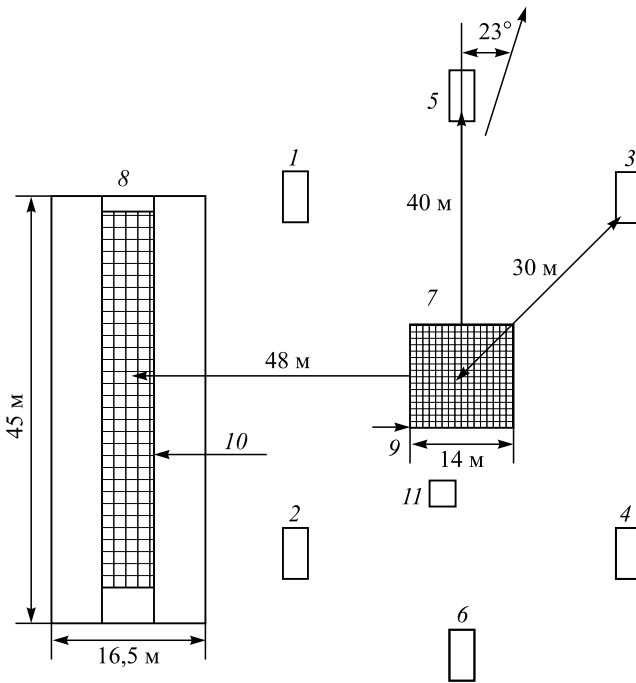


Рис. 1. Комплексная установка «Ковер-2»: 1–6 — выносные пункты; 7 — «Ковер»; 8 — мюонный детектор; 9 — жидкостный сцинтилляционный детектор; 10 — пластический сцинтилляционный детектор; 11 — нейтронный монитор

от энерговыделения в «Ковре». Этот триггер отбирает ШАЛ от первичных частиц с энергиями $E_0 > 10^{14}$ эВ. Частота таких событий $\sim 1,2$ Гц. Триггер M2 создается сигналом от энерговыделения в «Ковре» с порогом 2,5 ГэВ.

На расстоянии 48 м от центральной части установки расположен мюонный детектор (МД), он находится в подземном туннеле на глубине 500 г/см^2 , что соответствует энергетическому порогу 1 ГэВ. Мюонный детектор представляет собой вытянутую плоскость размером 5×35 м и состоит из 175 стандартных сцинтилляционных счетчиков площадью 1 м^2 каждый, прикрепленных к потолку подземного помещения. Каждый счетчик состоит из четырех пластиковых сцинтилляторов размером $0,5 \times 0,5 \times 0,05$ м, помещенных в светозащитный кожух. Пластиковые сцинтилляторы просматриваются фотоумножителями ФЭУ-49, состоящими из 12 динодов. Анодные сигналы ФЭУ суммируются по группам и образуют пять модулей по 35 детекторов в каждом. Сигнал с 12-го динода преобразуется логарифмическим RC-преобразователем с порогом 0,5 р. ч. в стандартный сигнал переменной длительности, который

подается на годоскоп амплитудных каналов. RC-преобразователь представляет собой логарифмический кодировщик, принцип работы которого основан на заряде емкости C импульсным током с ФЭУ и экспоненциальным разрядом его через резистор R . Постоянная времени преобразователя $\tau = RC$ равна 1 мкс. При заполнении сигнала от преобразователя импульсами с частотой 10 МГц обеспечивается точность измерения 10%. Диапазон измерения энерговыделения преобразователя составляет от 6 до 20 000 МэВ. Для записи информации со счетчиков используются два триггера установки «Ковер» и собственный триггер МД, который вырабатывается схемой совпадений при срабатывании любых трех из пяти модулей мюонного детектора.

УСТАНОВКА «КОВЕР-3»

Ливневая установка «Ковер-3» (рис. 2) создается на основе ныне действующей установки «Ковер-2». Подготовка эксперимента предполагает поэтапное увеличение непрерывной площади мюонного детектора (МД): сначала до 410 м², а в дальнейшем до 615 м². Для увеличения площади регистрации осей

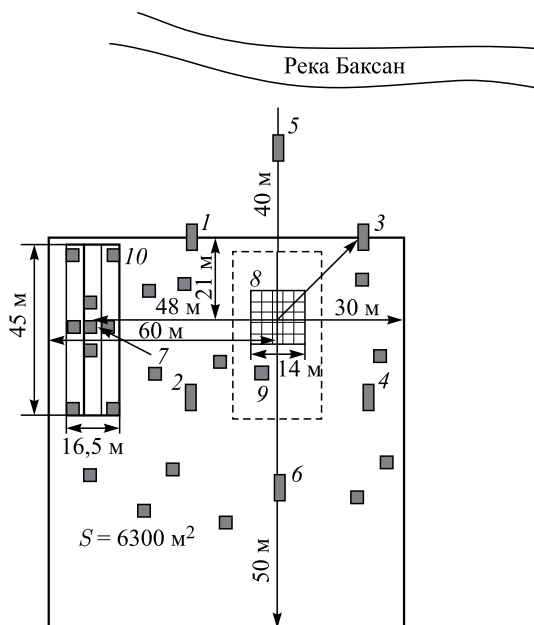


Рис. 2. Комплексная ливневая установка «Ковер-3»: 1–7 — выносные пункты со сцинтилляторами; 8 — «Ковер»; 9 — нейтронный монитор; 10 — мюонный детектор; серые квадраты — новые модули со сцинтилляционными детекторами

ШАЛ будут дополнительно установлены 20 модулей, в которых будут размещены по 18 жидкостных сцинтилляционных детекторов площадью 0,5 м² каждый.

В настоящее время в подземных туннелях МД уже установлены 410 сцинтилляционных детекторов с общей непрерывной площадью 410 м², которые полностью укомплектованы электроникой. Ведется работа по наладке электроники сцинтилляционных детекторов и созданию системы сбора информации для данной конфигурации МД. На поверхности поглотителя мюонного детектора уже собрано семь модулей на основе теплоизоляционного материала. Термостатирование модулей детекторов будет осуществляться подогревом их снизу при помощи элементов нагревательных гибких ленточных (ЭНГЛ). В каждом модуле детекторы будут установлены в три ряда, причем под каждым будут находиться по три нагревательные ленты мощностью 200 Вт каждая.

Общая мощность нагревательных элементов для модуля составит 1,8 кВт. Электрическая схема термостата обеспечит стабилизацию температуры детекторов на уровне $\pm 0,25$ °С в течение всего года, что обеспечит стабильность сигнала с детекторов на уровне 0,1 %.

ЖИДКОСТНЫЙ ДЕТЕКТОР

Для модулей установки «Ковер-3» создан жидкостный детектор со сцинтиллятором в пластиковых упаковках (рис. 3). Детектор представляет собой контейнер размером 66×74×30 см, собранный из толстослойной фанеры толщиной 10 мм. На дне детектора расположены 10 пластиковых упаковок. Упаковка представляет собой пластиковую бутылку размером 0,14×0,14×0,31 м, в которую залит сцинтиллятор на основе реактивного топлива Т-6 плотностью 0,82 г/см³.

В качестве светоотражающей внутренней поверхности нового детектора в одном случае использовался слой белой краски, нанесенной на поверхность,

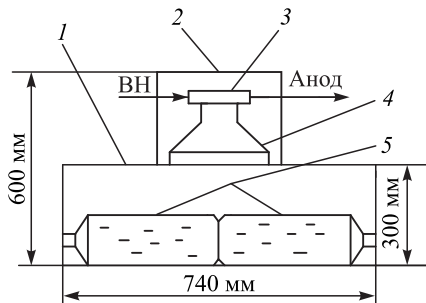


Рис. 3. Конструкция нового жидкостного сцинтилляционного детектора: 1 — фанерный контейнер; 2 — светозащитный кожух; 3 — делитель высокого напряжения; 4 — ФЭУ-49; 5 — пластиковые упаковки с жидким сцинтиллятором

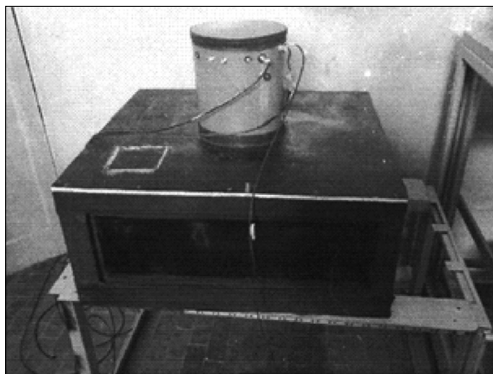


Рис. 4. Внешний вид нового жидкостного сцинтиляционного детектора

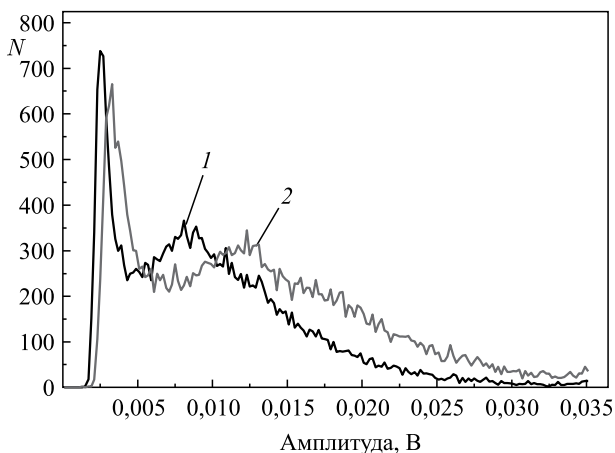


Рис. 5. Сравнение амплитудных спектров одиночных мюонов, полученных на новом детекторе, при покрытии внутренней поверхности детектора: 1 — белой краской; 2 — алюминиевой фольгой

а в другом случае — приклеенная к поверхности с помощью скотча алюминиевая фольга. На рис. 4 представлен внешний вид жидкостного детектора.

На рис. 5 представлено сравнение амплитудных спектров одиночных мюонов для обоих случаев, откуда следует, что покрытие внутренней поверхности алюминиевой фольгой дает наибольший коэффициент отражения фотонов.

Спектры набирались с помощью осциллографа LECROY WaveJet при напряжении делителя детектора $U = -1700$ В. Как видно из рис. 5, мак-

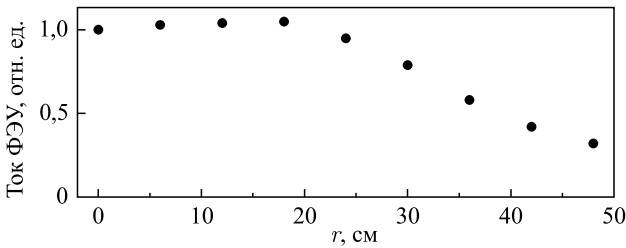


Рис. 6. Неоднородность жидкостного детектора, измеренная с помощью радиоактивного источника

симум первого спектра соответствует $\sim 8,5$ мВ, а второго — $12,5$ мВ, т.е. во втором случае эффективность светосбора на 32 % больше, чем в первом случае, откуда следует, что в качестве отражателя фотонов в новом детекторе следует использовать алюминиевую фольгу. Неоднородность светосбора детектора была измерена с помощью радиоактивного источника ^{137}Cs : энергия γ -линии $0,661$ МэВ, активность $2,2 \cdot 10^8$ Бк. Сигнал с токового выхода делителя измерялся стрелочным измерительным прибором (точность измерения 1 %). На рис.6 представлена неоднородность жидкостного детектора, измеренная с помощью радиоактивного источника ^{137}Cs .

Неоднородность коэффициента светосбора вычисляется по формуле

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (1)$$

где I_{\max} — максимальное значение тока; I_{\min} — минимальное значение тока при помещении источника на углу детектора в предположении, что размер светового пятна стремится к нулю. Вычисленная таким образом неоднородность коэффициента светосбора детектора оказалась равной 0,27. Неоднородность коэффициента светосбора была также определена путем измерения положения максимума спектра мюонов при их прохождении через различные точки детектора. Место прохождения мюонов выбиралось с помощью управляющего сигнала от маленького счетчика с размерами сцинтиллятора $14 \times 14 \times 5$ см. Счетчик передвигался по диагонали детектора с шагом 6 см. В этом случае величина неоднородности оказалась равной 0,26.

Величину наиболее вероятного энерговыделения, соответствующего прохождению одной частицы в числе фотоэлектронов с фотокатода ФЭУ-49, для нового детектора можно определить путем засвечивания фотоумножителя вспышками постоянной интенсивности от светодиода типа L-71113PBC и измерением ширины на половине высоты $\Delta A_{1/2}$ спектра импульсов светового диода, причем максимум этого спектра A_{\max} должен совпадать с максимумом

спектра энергвыделений мюонов. Среднее число фотоэлектронов определяется по формуле

$$N = \frac{(2,36)^2 k}{(\Delta A_{1/2}/A_{\max})^2}, \quad (2)$$

где $k = 2$ — коэффициент, учитывающий дисперсию числа фотоэлектронов на первом диноде ФЭУ-49 [4]. Величина N оказалась равной ~ 360 фотоэлектронам.

Для измерения абсолютной величины коэффициента светосбора был изготовлен квазиизотропный источник света диаметром 4,0 см с полостью внутри диаметром 1,5 см, в которую помещался радиоактивный источник ^{137}Cs в форме таблетки активностью 10^6 Бк. Источник света укреплялся на подставке на различных расстояниях от него (рис. 7).

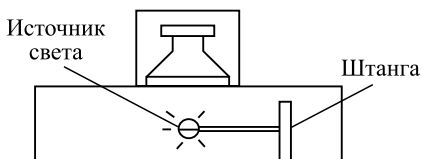


Рис. 7. Схема нового детектора для определения коэффициента светосбора

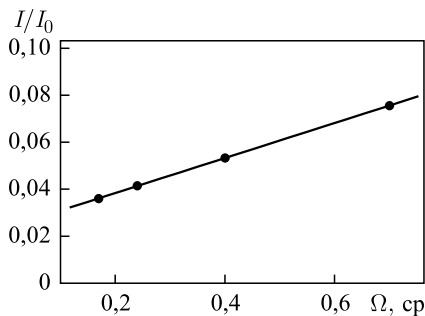


Рис. 8. Определение коэффициента светосбора

На рис. 8 представлена зависимость анодного тока ФЭУ от телесного угла Ω , под которым виден фотокатод из точки, где расположен источник. Этот ток является суммой токов от прямого и отраженного света и определяется по формуле

$$I = I_0 \left[\frac{\Omega}{4\pi} + k \left(1 - \frac{\Omega}{4\pi} \right) \right], \quad (3)$$

где k — коэффициент светосбора; I_0 — ток при $\Omega = 4\pi$. Значение тока I_0 можно получить путем экстраполяции прямой на рис. 8 к точке, соответствующей $\Omega = 4\pi$. Полученное таким образом из формулы (3) значение коэффициента светосбора $k = 3,3\%$.

Калибровка детектора может быть осуществлена с помощью проникающих заряженных космических лучей. При прохождении через детектор релятивистской заряженной частицы ионизационные потери составляют $2 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{г}$. Тогда для детектора толщиной $11,5 \text{ г}/\text{см}^2$ и угловым распределением $\sim \cos^2 \theta$ [5] средняя потеря энергии в сцинтиляторе составит $30,7 \text{ МэВ}$. Оценка энергии, идущей на образование одного фотона в реактивном топли-

ве Т-6, дает значение ~ 120 эВ, а число фотоэлектронов, образовавшихся на фотокатоде ФЭУ, равно

$$N = \frac{30,7 \cdot 10^6}{120} k \eta F, \quad (4)$$

где k — коэффициент светосбора детектора; $\eta = 0,1$ — квантовая эффективность фотокатода; F — коэффициент, учитывающий долю света, выходящего из сцинтиллятора; $F = 0,5$ [6]. С учетом коэффициента светосбора k имеем

$$N = \frac{30,7 \cdot 10^6}{120} \cdot 0,033 \cdot 0,1 \cdot 0,5 = 420. \quad (5)$$

Сравнивая значения выражений (3) и (6), видим, что они отличаются примерно на 16%. Это расхождение можно объяснить тем, что при оценке числа фотоэлектронов либо использован заниженный коэффициент светосбора, либо занижена доля света, выходящего из жидкого сцинтиллятора.

Представленный в данной работе жидкостный сцинтилляционный детектор не уступает по характеристикам стандартному пластическому детектору, который используется в МД установки «Ковер-2». При этом стоимость нового детектора будет дешевле примерно в семь раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поиск локальных источников гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ проводился на установке «Ковер» Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН в 1980-е гг. От Крабовидной туманности была зарегистрирована вспышка гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ [7], тогда как для таких источников гамма-излучения, как Лебедь X-3, Геркулес X-1, Лебедь X-1, Геминга и 4U115 + 63, были получены лишь верхние пределы на потоки гамма-квантов. Типичный верхний предел потока для них составлял $I_\gamma = (1-5) \cdot 10^{-14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [8]. Сконструированный жидкостный детектор на установке «Ковер-2» будет использоваться в модулях установки «Ковер-3», которые увеличат площадь локации осей ливней, что, в свою очередь, позволит увеличить статистику зарегистрированных событий и понизить энергетический порог первичного космического излучения.

Работа выполнена на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе (Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН) при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-02-00687-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kalashev O. E., Troitsky S. V. // JETP Lett. 2016. V. 100. P. 761.
2. Dzhabpuev D. D., Alekseenko V. V., Lidvansky A. S., Stenkin Yu. V., Petkov V. B., Mikhailova O. I., Kudzhaev A. U., Chernyaev A. B., Tsyabuk A. L. // Proc. of the 30th ICRC. Merida, 2007. V. 4. P. 19.

3. Джатпуев Д. Д., Алексеенко В. В., Волченко В. И., Волченко Г. В., Гулиев Ж. Ш., Гулиева Е. В., Куджаев А. У., Коновалов Ю. Н., 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. 542–544.
4. Дадыкин В. Л., Цябук А. Л. Чувствительность ФЭУ-49 к черенковскому излучению // ПТЭ. 1980. № 6. С. 41–43.
5. Хаякава С. М. Физика космических лучей. Т. 1. М.: Наука, 1973. С. 473.
6. Алексеев Е. Н., Буткевич А. В., Воеводский А. В., Карнов С. Н., Клименко Н. Ф., Когай М. И., Коновалов Ю. Н., Лупенко Г. В., Малкиель С. Г., Марков В. Я., Тетенков А. Ф., Чудаков А. Е. Большой пластический сцинтилляционный детектор. Модернизация Баксанского подземного телескопа. Препринт ИЯИ П0610. М., 1989. 17 с.
7. 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–L88.
8. Алексеенко В. В., Воеводский А. В., Коновалов Ю. Н., Конопля М. М., Марчук Д. Л., Стенькин Ю. В., Чудаков А. Е. Установка «Ковер-2» для поиска локальных источников гамма-квантов с энергией выше 10^{14} эВ // Материалы ВККЛ. Алма-Ата, 1989. Ч. 1. С. 27–28.