

ГАММА-АСТРОНОМИЯ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ НА УСТАНОВКЕ «КОВЕР» БАКСАНСКОЙ НЕЙТРИННОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ИЯИ РАН

В. С. Романенко^{a}, В. Б. Петков^{a,b}, А. С. Лидванский^a*

^a *Институт ядерных исследований Российской академии наук
117312, Москва, Россия*

^b *Институт астрономии Российской академии наук
119017, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 7 октября 2021 г.,
после переработки 17 ноября 2021 г.
Принята к публикации 17 ноября 2021 г.

Установка «Ковер» Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований РАН, предназначенная для изучения широких атмосферных ливней космических лучей, была введена в строй достаточно давно, в 1974 году. Однако она неоднократно модернизировалась, расширялась и продолжает функционировать по нескольким программам. В настоящей работе приводится обзор основных результатов в области гамма-астрономии, полученных на установке «Ковер» за все время ее работы, а также обсуждаются текущее состояние дел и новый этап в развитии установки.

Статья для специального выпуска ЖЭТФ, посвященного 100-летию А. Е. Чудакова

DOI: 10.31857/S004445102204006X
EDN: DPVKPR

1. ВВЕДЕНИЕ

Гамма-астрономия сверхвысоких энергий переживала пик активности в 1980-х годах, когда сенсационные данные группы из Кильского университета по источнику Лебедь X-3 породили множество экспериментальных и теоретических работ в этой области. Установка «Ковер» БНО ИЯИ РАН участвовала в кампании по наблюдению этого и некоторых других источников. Результаты для источника Лебедь X-3 были опубликованы в работе [1], где был установлен верхний предел на поток гамма-излучения сверхвысоких энергий и опровергнуты результаты нескольких установок, получивших ранее значимые цифры потоков. Однако в октябре 1985 г. были получены значительные превышения над фоном, которые были интерпретированы как вспышка гамма-излучения сверхвысокой энергии. Другое значимое превышение было зарегистрировано от Крабовидной туманности 23 фев-

раля 1989 г., и эта вспышка была подтверждена еще несколькими установками для регистрации широких атмосферных ливней. Две эти вспышки были единственными положительными эффектами, зарегистрированными в то время установкой Ковер по программе гамма-астрономии, и обе они подробно обсуждаются в разд. 2 настоящей статьи.

Впоследствии к установке «Ковер» был добавлен подземный мюонный детектор (МД) площадью 175 м², регистрирующий мюонную компоненту широких атмосферных ливней (ШАЛ) с пороговой энергией 1 ГэВ. Это расширило возможности установки применительно к гамма-астрономии. Поскольку ливни от первичных фотонов по сравнению с ливнями от первичных протонов и ядер существенно обеднены адронами (и, как следствие, мюонами), информация с МД может использоваться для выделения ливней от первичных фотонов сверхвысоких энергий. Установка в новой конфигурации получила название «Ковер-2», и в данной конфигурации она работает по настоящее время.

В то же время интерес к гамма-астрономии сверхвысоких энергий резко возрос, начиная с 2013 года, в связи с важными результатами, по-

* E-mail: vsrom94@gmail.com

лученными в области нейтринной астрофизики. Коллаборация IceCube сообщила [2] о регистрации нейтринным телескопом, расположенном на Южном полюсе, нескольких нейтрино астрофизического происхождения с энергиями от 30.2 до 1141 ТэВ. В работе [3] показано, что подобные нейтрино могут образовываться в результате распада заряженных пионов. Как следствие, должны генерироваться и нейтральные пионы тех же энергий. При их распадах возникают пары фотонов, которые будут создавать дополнительные потоки гамма-излучения в области энергий свыше 100 ТэВ. Поскольку нейтринные события IceCube не ассоциированы с конкретными источниками, наблюдение их партнеров в гамма-диапазоне не может осуществляться путем увеличения углового разрешения для выделения гамма-ливней из фона протонных ШАЛ, как это делается в современной гамма-астрономии для точечных источников. Необходимо проводить селекцию событий по другим параметрам, и метод регистрации бедных мюонами ливней, впервые предложенный в работе [4], вновь становится актуален.

Для его успешной реализации требуются установки с мюонными детекторами большой площади, и такие установки создаются путем модернизации имеющихся или строятся заново. В России такая работа идет в астрофизическом комплексе TAIGA [5]. Среди зарубежных проектов несомненным лидером является гигантская установка коллаборации LHAASO [6] в Китае. Можно назвать еще установки ALPACA [7] в Боливии, GRAPES-3 [8] в Индии и многие другие.

Некоторые из этих установок получили в последние годы очень яркие результаты в области гамма-астрономии сверхвысоких энергий. Можно вспомнить о регистрации гамма-излучения от Крабовидной туманности установками Tibet-AS γ [9] и HAWC [10]. Коллаборация HAWC [11] сообщила также о наблюдении космических лучей в диапазоне энергий 1–100 ТэВ от области активного звездообразования Кокон Лебедя [12]. Диффузное гамма-излучение в этой области энергий было обнаружено коллаборацией Tibet-AS γ [13]. Но пожалуй наиболее значимый результат это открытие так называемых галактических ПэВатронов китайской коллаборацией LHAASO [14].

Среди этих достижений можно упомянуть и о регистрации установкой «Ковер-2» [15] ливней с энергией выше 300 ТэВ из области созвездия Лебедя, совпадающих по времени прихода и направлению с оповещением о нейтрино сверхвысокой энергии

от обсерватории IceCube. Планы модернизации и развития установки «Ковер-2» были опубликованы давно [16]. Модернизация и расширение установки ведется поэтапно, и в настоящее время близок к завершению проект «Ковер-3», который должен сделать одну из самых старых установок в мире эффективно работающей и конкурентоспособной.

2. УСТАНОВКА «КОВЕР»

Установка «Ковер» создавалась как многоцелевой детектор космических лучей, но регистрация широких атмосферных ливней с самого начала была одной из главных ее целей. Таким образом, когда возник интерес к гамма-астрономии сверхвысоких энергий, на ней немедленно началась реализация программы исследований в этой области. Установка расположена на высоте 1700 м над уровнем моря, что соответствует глубине в атмосфере 840 г/см² [17]. Центральная часть установки находится в здании под крышей толщиной 29 г/см² и состоит из 400 жидкостных сцинтилляционных счетчиков, расположенных в виде квадрата со стороной 14 м с непрерывной площадью 196 м². Стандартный сцинтилляционный детектор представляет собой алюминиевый контейнер размерами 0.7 × 0.7 × 0.3 м³, заполненный жидким сцинтиллятором на основе уайт-спирита. В шести выносных пунктах (ВП) с тонкой крышей (около 1.2 г/см²) находятся 108 таких же счетчиков (в каждом по 18), общая площадь ВП составляет 54 м². Схема установки «Ковер» изображена на рис. 1: 400 счетчиков «Ковра» были разделены на четыре группы А–Г, импульсы с каждой группы подавались на схему четырехкратных совпадений, сигнал с которой использовался для старта измерения задержек с выносных пунктов регистрации. В то же время, пятикратное совпадение этого сигнала с сигналами от четырех выносных пунктов 1–4 генерирует импульс, запускающий систему сбора данных.

Угловое разрешение установки для описанного выше триггера оценивалось экспериментально по распределению разностей временных задержек. Для любого азимутального направления ливня две параллельные пары внешних детекторов находятся в равных условиях. Таким образом, разница между парами

$$\Delta t = (t_1 - t_2) - (t_3 - t_4)$$

характеризует неопределенность восстановления направления. Нестабильность стартового сигнала, которая велика из-за больших линейных разме-

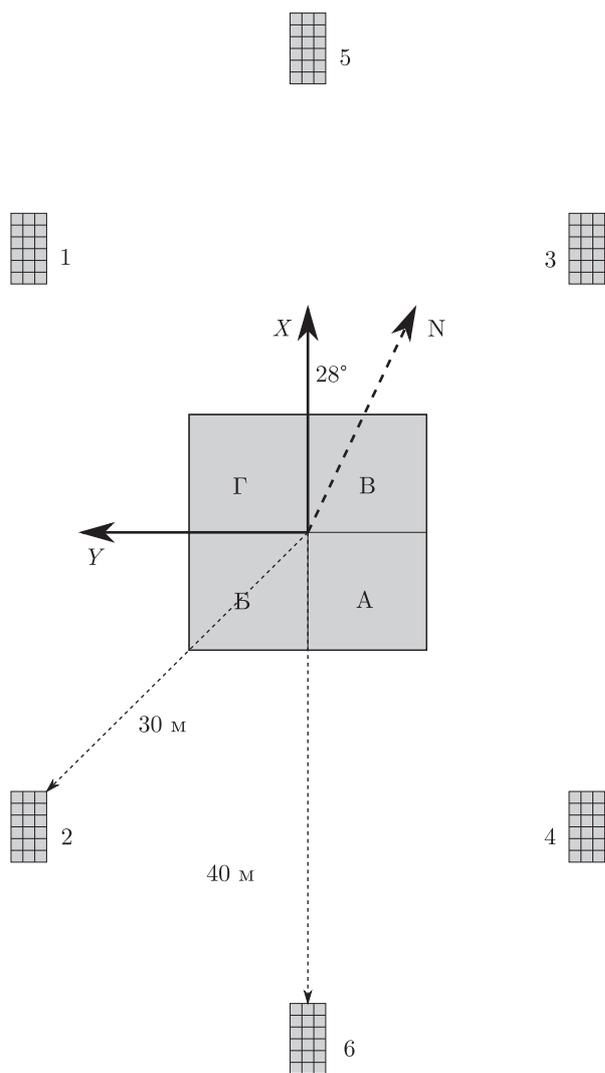


Рис. 1. Схема ливневой установки «Ковер»

ров установки, исключалась из этого значения. Среднеквадратичное значение Δt , определенное на большой выборке данных, равнялось 5.2 нс, что соответствует угловому разрешению для вертикальных ливней $\sigma_\theta \sim 1.1^\circ$ [1, 18]. Однако эта первоначальная оценка оказалась чересчур оптимистичной. Впоследствии специальный эксперимент с детектором черенковского излучения показал [19], что угловое разрешение установки составляет 4.7° для 86 % C.L. и 3.1° для 72 % C.L.

2.1. Наблюдение возможной вспышки гамма-излучения сверхвысоких энергий в источнике Лебедь X-3

Лебедь X-3 — рентгеновский источник, который является двойной системой. В оптическом диа-

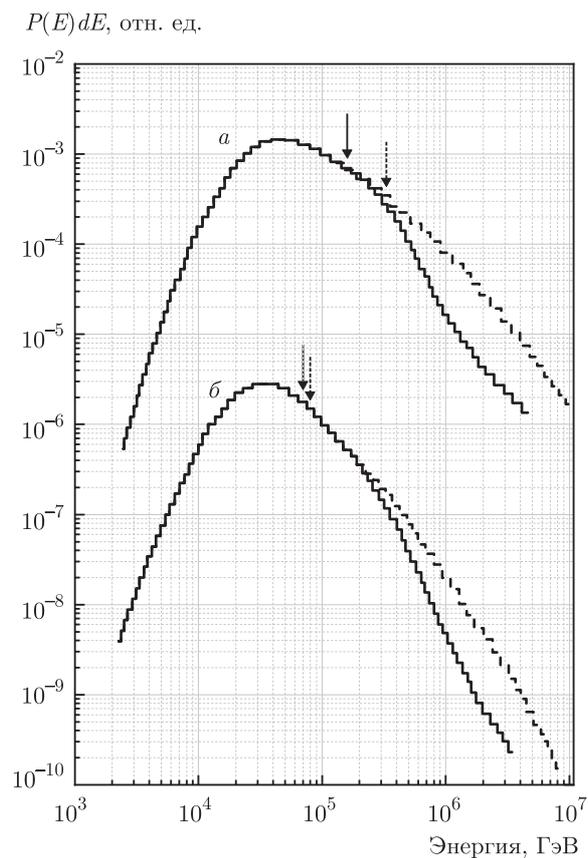


Рис. 2. Рассчитанные дифференциальные спектры фотонных ШАЛ регистрируемых установкой «Ковер» для двух разных спектров: а — фотонов вблизи источника ($\gamma = 2.1$); б — вблизи Земли ($\gamma = 2.7$). Сплошными линиями показаны спектры с учетом поглощения в межзвездной среде. Стрелки соответствуют медианным значениям

пазоне он незаметен из-за поглощения излучения в галактической плоскости, но хорошо наблюдается во всех остальных диапазонах электромагнитного излучения. Лебедь X-3 является переменным источником в инфракрасном, рентгеновском и радио-диапазонах [20–22]. Обнаружение транзиентного гамма-излучения с энергией выше 100 МэВ указывает на эффективное ускорение космических лучей высоких энергий в данном источнике [23].

Один из ярких радиовсплесков от Лебедь X-3 был зарегистрирован в октябре 1985 года, и максимальная плотность потока достигла 9 октября значения 18 Ян на длине волны 11.1 см. Во время этой радиовспышки было обнаружено заметное превышение над фоном числа зарегистрированных ШАЛ от источника в течение 14–16 октября [1]. Энергия отдельных ливней не измерялась, и расчетный спектр зарегистрированных ливней существенно за-

Таблица 1

Дата	14.10.1985	15.10.1985	16.10.1985
Сигнал	106	84	105
Шум	77.2	68.8	88.2
Вероятность	10^{-3}	$4.6 \cdot 10^{-2}$	$4.4 \cdot 10^{-2}$
Сигнал/Шум	1.4 ± 0.14	1.24 ± 0.14	1.21 ± 0.12

висит от предполагаемого спектра гамма-излучения от источника. На рис. 2 представлены дифференциальные распределения энергий ливней для данного триггера и двух значений степенного показателя спектров гамма-лучей: $\gamma = 2.7$, соответствующего спектру первичных космических лучей, и $\gamma = 2.1$, которое можно рассматривать как «эталонный спектр» для экспериментальных данных по гамма-излучению Лебедь X-3 в широком диапазоне энергий.

Эффект учета межзвездного поглощения гамма-квантов микроволновым фоновым излучением, связанный с процессом $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$, также показан на рис. 2. Для спектра $\gamma = 2.7$ поглощение незначительно изменяет медианную энергию распределения (она равна $7 \cdot 10^{13}$ эВ вместо $8 \cdot 10^{13}$ эВ). Для плоского спектра $\gamma = 2.1$ эффект более заметный: средняя энергия изменяется от $3.3 \cdot 10^{14}$ эВ до $1.6 \cdot 10^{14}$ эВ.

Для анализа данных использовался следующий метод. Сравнивается темп счета ливней в круглой угловой ячейке с центром в источнике радиусом 2.5° (сигнал, ON) с фоновым темпом счета (шум, OFF) в четырех внешних ячейках той же формы и размера. Центры одной пары ячеек вне источника смещены от исходного положения на $\pm 5^\circ$ по склонению, центры другой пары смещены на $\pm 6.6^\circ = (5^\circ / \cos \delta)$ по прямому восхождению. При таком выборе все внешние ячейки контактируют и имеют тот же телесный угол, что и ячейка Лебеда. Данные были скорректированы на общий темп со всех направлений (чтобы исключить влияние атмосферного давления) и угловое распределение ливней.

Следует заметить, что в течение предыдущего года наблюдений, с 1 июля 1984 г. по 30 июня 1985 г., превышения числа ливней от направления на Лебедь X-3 не было обнаружено. По данным за октябрь 1985 г. было получено, что наилучшее соотношение сигнал/шум находилось в трехдневном окне 14–16 октября. Количество событий в ячейке источника, усредненное значение событий в ячейках фона

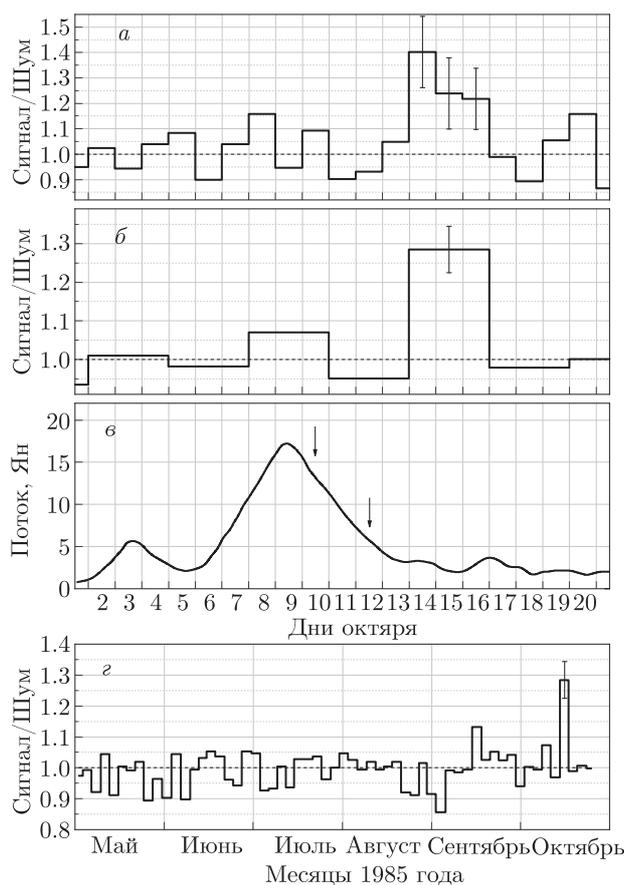


Рис. 3. Отношение сигнал/шум для октября 1985 года: а — с шагом один день в октябре; б — с шагом три дня; в — профиль радиовспышки, две стрелки соответствуют коротким вспышкам, зарегистрированным гамма-телескопом Gulmarg [25] с порогом около 6 ТэВ; з — отношение сигнал/шум за период май–октябрь 1985 г.

и отношения сигнал/шум приведены в табл. 1. Можно видеть, что фон меняется от одного дня к другому. В основном это связано с коротким перерывом в наборе данных 15 октября. Фоновые значения 14 и 16 вполне совместимы, особенно с учетом поправки на атмосферное давление.

На рис. 3 показаны отношения сигнал/шум, а также профиль радиовсплеска на длине волны 11.1 см. Максимумы радиоизлучения (9 октября) и избыток ШАЛ (14 октября) не совпадают. На тот момент возникла проблема объяснения временной задержки, так как механизмы генерации радиоволн и гамма-излучения сверхвысоких энергий в Лебедь X-3 не были известны. Однако вскоре Березинский предложил [24] более простую и естественную модель, в которой гамма-излучение сверхвысоких энергий поглощается радиоизлучением внутри ис-

точника. Такое гамма-излучение может выйти наружу с некоторой задержкой, после уменьшения потока радиоизлучения, и, следовательно, уменьшения поглощения на радиоизлучении.

В табл. 1 представлены пуассоновские вероятности реализации определенного количества событий при заданном среднем фоне. Эти вероятности были рассчитаны с использованием доверительных интервалов, приведенных в статье [26]. По оценке, вероятность того, что событие с тремя подряд днями значительного превышения реализовано из-за флуктуаций, равна $7 \cdot 10^{-5}$. Это формально рассчитанная вероятность появления избытка в определенный момент. С учетом равных шансов появления этого превышения в любой момент времени вокруг вспышки была получена вероятность порядка 10^{-3} .

Данные одной лишь установки «Ковер» не могли быть рассмотрены как убедительное доказательство вспышки в Лебедь X-3 без подтверждения от других экспериментов, которых не последовало. Но стоит заметить, что в июне 1989 г. японскойливневой установкой Огуа был зарегистрирован [27] избыток фотонов сверхвысоких энергий с высокой статистической значимостью, который также совпал по времени с мощной вспышкой в радио-диапазоне. В более современной работе [28] также описано совместное наблюдение вспышки наземным радиотелескопом и орбитальной гамма-обсерваторией.

2.2. Наблюдение вспышки в Крабовидной туманности

Наблюдение незначительного избытка регистрируемых установкой ШАЛ от Лебедь X-3 послужило дополнительным стимулом для поиска других источников. Очередное интересное событие случилось 23 февраля 1989 года. На установке «Ковер» была зарегистрирована вспышка гамма-излучения сверхвысоких энергий в Крабовидной туманности [29]. Данное событие было обнаружено по значительному суточному превышению числа зарегистрированных ШАЛ над фоном, который был набран в течение 1985–1989 годов. Наиболее интересным является тот факт, что после первой публикации данного результата другие установки подтвердили вспышку в Крабовидной туманности.

Анализ данных за 23 февраля 1989 года (по тому же алгоритму, как и для Лебедь X-3) показал, что 55 событий попали в центральную ячейку, привязанную к Крабовидной туманности, тогда как значение восьми фоновых ячеек равнялось 34.1 события. Это соответствует соотношению сигнал/шум 1.6 и

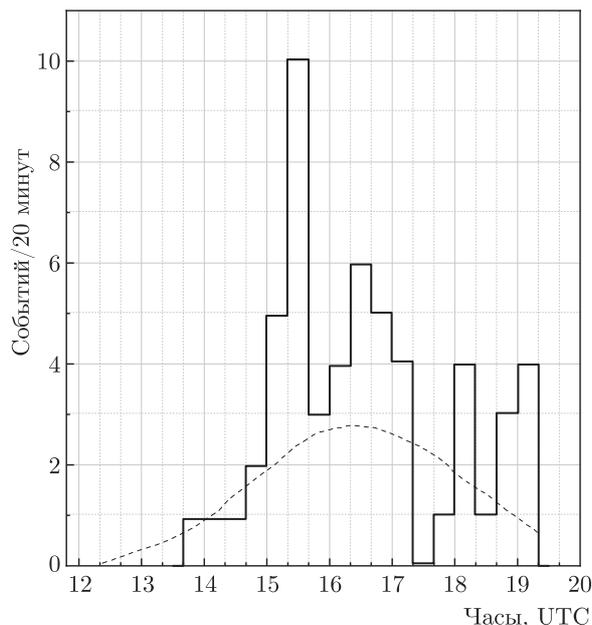


Рис. 4. Распределение событий в 20-минутном интервале, пришедших от Крабовидной туманности 23 февраля 1989 года. Пунктирная линия соответствует ожидаемому фону

Таблица 2. Результат наблюдений вспышки в Крабовидной туманности 23 февраля 1989 года. Значимость приведена без учета фазового анализа пульсара

	Время набл., UTC	Сигнал/Шум	σ
«Ковер»	15–18	1.61	3.1
KGF	13–16	1.97	3.4
EAS-TOP	17–20	1.49	2.1

статистической значимости 3.1 стандартных отклонения. Распределение этих 55 событий показано на рис. 4 вместе с ожидаемым фоном, который нормирован на среднее число фоновых событий. После 19 ч 20 мин UTC установка не работала.

Как говорилось ранее, данное событие было зарегистрировано и другими установками: KGF [30] (Индия), EAS-TOP [31] (Италия). Итоговые результаты приведены в табл. 2. По данным установки KGF был получен также поток фотонов:

$$I(E_\gamma > 10^{14} \text{ эВ}) = (8 \pm 2) \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Установкой EAS-TOP:

$$I(E_\gamma > 2 \cdot 10^{14} \text{ эВ}) = 2 \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

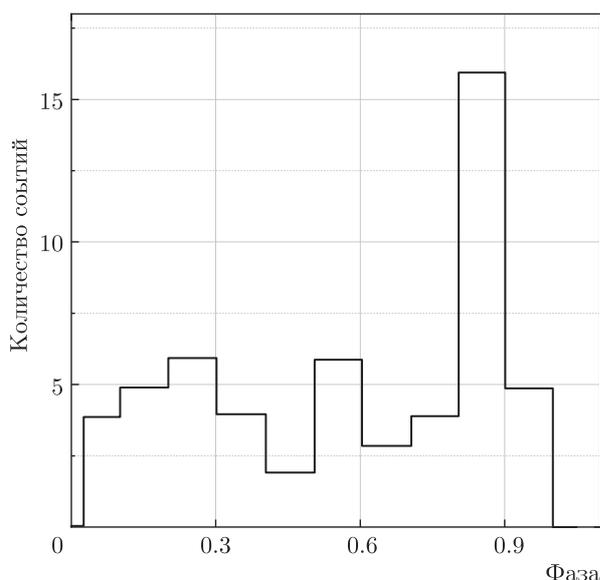


Рис. 5. Относительное фазовое распределение 55 событий после барицентрической обработки времен прихода и применения значений периода пульсара и его производной в соответствии с эфемеридой Jodrell Bank

Поток, полученный установкой «Ковер», находился между двумя этими значениями, что говорит о хорошем согласии этих результатов.

Времена прихода событий на установке «Ковер» фиксировались с около миллисекундной точностью, что позволило выполнить фазовый анализ для 55 событий. Результат показан на рис. 5. Фаза показана относительно произвольной начальной точки в цикле импульса пульсара в Крабовидной туманности, поскольку абсолютное время часов установки не было установлено с достаточной точностью для определения абсолютной фазы относительно радиоимпульса. Фазовый анализ с периодом пульсара по данным KGF также показал неоднородность. Они смогли измерить абсолютную фазу событий и обнаружили, что все дополнительные события приходятся на первую половину периода. Вероятность случайной реализации наблюдаемого распределения равна 0.01 для исходного равномерного фазового распределения.

3. УСТАНОВКА «КОВЕР-2»

В связи с результатами, которые были получены в области гамма-астрономии сверхвысоких энергий и появлением в мире новых установок по регистрации ШАЛ, было необходимо провести существенную модернизацию установки «Ковер» с целью отделе-

ния ливней, рожденных первичными фотонами, от ливней, рожденных первичными протонами и ядрами. Такое разделение возможно благодаря тому, что ливни от первичных фотонов существенно обеднены адронами (и, как следствие, мюонами), по сравнению с ливнями от первичных протонов и, тем более, ядер. Таким образом, если отбирать ШАЛ, обедненные адронами и мюонами, то можно достаточно эффективно выделять ливни от первичных гамма-квантов. Для этого в составе установки «Ковер» был создан мюонный детектор. В данной конфигурации установка, получившая название «Ковер-2», работает с 1999 года. Регистрация мюонной компоненты ШАЛ позволила улучшить эффективность работы как в области гамма-астрономии сверхвысоких энергий, так и при изучении химического состава первичного космического излучения [32].

Мюонный детектор [33] установки «Ковер-2» расположен в трех подземных туннелях с размерами $5.5 \times 42 \text{ м}^2$, общий центр которого расположен на расстоянии 48 метров от центра «Ковра». Толщина грунта над МД около 500 г/см^2 , что примерно соответствует пороговой энергии 1 ГэВ для вертикальных мюонов. Первоначально планировалось заполнить все туннели жидким сцинтиллятором с толщиной слоя 30 см, упакованным в пластиковые мешки, который просматривался расположенными на потолке туннелей ФЭУ. Впоследствии от этой идеи отказались из-за негерметичности используемых пластиковых мешков и низкой эффективности регистрации мюонов. На следующем этапе создания МД второй (центральный) туннель был оснащен 175 счетчиками на основе пластического сцинтиллятора площадью 1 м^2 и толщиной 5 см. Сцинтиллятор просматривается одним фотоэлектронным умножителем ФЭУ-49Б. Счетчики были разделены на 5 модулей по 35 в каждом, и анодные импульсы ФЭУ счетчиков каждого модуля суммируются по 35 штук в пяти аналоговых сумматорах. Сигналы с сумматоров подаются на входы ЗЦП (зарядовый – цифровой преобразователь) с порогами срабатывания 0.5 р. ч. (1 р. ч. — релятивистская частица — наиболее вероятное значение энерговыделения в детекторе, равное 10 МэВ для счетчиков МД). Полное энерговыделение в МД, измеренное в р. ч., обозначается как n_μ и используется для оценки числа мюонов в МД.

За время работы установки «Ковер-2» использовались два триггера для записи информации о событии в МД. До 2018 года триггер вырабатывался следующим образом: импульсы с ЗЦП подавались на вход схемы отбора событий, которая при наличии двух и более импульсов на входе вырабатыва-

ет выходной триггерный сигнал МД. Таким образом, сохранялась информация о событиях в МД при срабатывании двух и более модулей, т. е. при регистрации в МД не менее двух мюонов. Такой триггер существенно ограничивал возможность отбора ливней от первичных фотонов при энергиях ниже 700 ТэВ. С начала 2018 года информация о событиях в МД записывается по ливневому триггеру «Ковра», что позволило отбирать ливни от первичных фотонов с энергиями выше 300 ТэВ. Для выделения на установке «Ковер-2» ливней от первичных фотонов сверхвысоких энергий используется корреляционная зависимость $n_\mu - N_{ch}$, где N_{ch} — экспериментально измеренное полное число частиц в ШАЛ — используется для оценки энергии первичных частиц.

3.1. Ограничения на потоки диффузного гамма-излучения

Поиск диффузного гамма-излучения с энергией выше 700 ТэВ проведен на установке «Ковер-2» по экспериментальным данным за период с 1999 по 2011, в течение которого установка работала в штатном режиме 3390 суток [34].

За это время было зарегистрировано $1.3 \cdot 10^5$ ШАЛ, удовлетворяющих следующим условием отбора:

- ось ливня находится в пределах «Ковра»,
- зенитный угол $\theta < 40^\circ$,
- полное энерговыделение в «Ковре» не менее 10^4 р. ч.,
- количество сработавших счетчиков «Ковра» с энергетическим порогом 10 р. ч. не менее 300.

Корреляционная зависимость $n_\mu - N_{ch}$ для зарегистрированных ШАЛ и смоделированных ливней от первичных фотонов, приведена на рис. 6. Красная линия выделяет область, в которой есть только события от смоделированных гамма-ливней, при отсутствии зарегистрированных в эксперименте ШАЛ (т. е. отсутствует фон). Это позволяет применить следующую формулу для расчета верхнего предела для потока диффузного гамма-излучения для 90 % C.L.:

$$I_\gamma(> E_0) = n_{90}/S\Omega T \varepsilon_1(> E_0) \varepsilon_2(> E_0),$$

где $n_{90} = 2.3$, $S\Omega T = 6.2 \cdot 10^{14}$ см²·ср·с, ε_1 — эффективность регистрации и восстановления параметров ливня, ε_2 — эффективность отбора гамма-ливней.

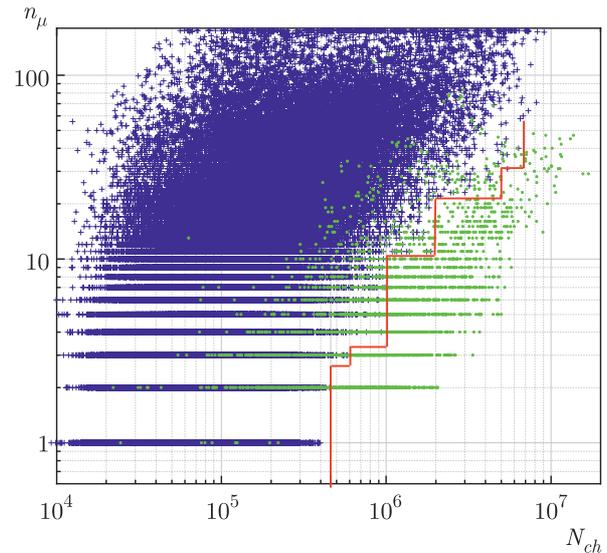


Рис. 6. Корреляционная зависимость n_μ от N_{ch} для экспериментально зарегистрированных ливней (синие крестики) и смоделированных гамма-ливней (зеленые точки). Красная линия соответствует границе для экспериментальных событий

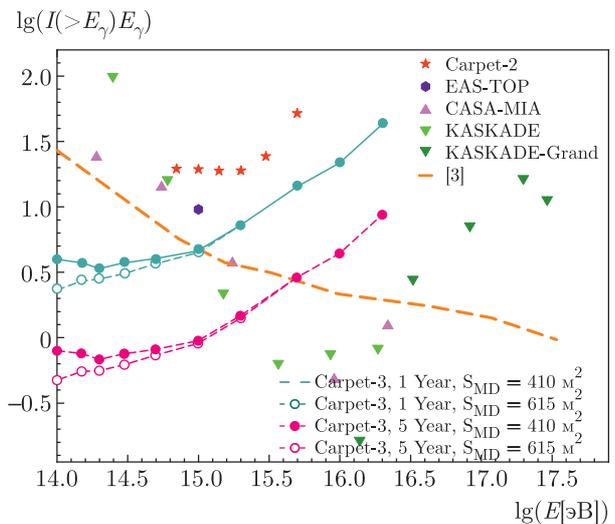


Рис. 7. Ограничения на интегральный поток космического диффузного гамма-излучения, полученные на установке «Ковер-2», в сравнении с результатами других экспериментов и расчетными потоками из работы [3]. На рисунке также приведены ожидаемые ограничения на поток космического диффузного гамма-излучения для двух конфигураций установки «Ковер-3» и для двух значений времени набора информации

Полученные на установке «Ковер-2» за 3390 суток набора информации ограничения на интегральный поток космического диффузного гамма-излучения в зависимости от энергии первичных фотонов приводятся на рис. 7 вместе с результатами других экспериментов и расчетным потоком из работы [3].

3.2. Наблюдение вспышки в созвездии Лебеда

20 ноября 2020 года нейтринная обсерватория IceCube сообщила о регистрации события (IceCube-201120A) с энергией 154 ТэВ. Внутри области локализации этого события находятся несколько потенциальных источников гамма-излучения сверхвысоких энергий, в том числе Лебедь-Х3, от которого в 1985 году установкой «Ковер» был зарегистрирован сигнал.

Вскоре, 2 и 9 декабря, были сделаны сообщения на портале The Astronomer's Telegram, ATel#: 14237 и ATel# 14255. В первом сообщении был оценен поток гамма-излучения с энергией более 100 ТэВ от Кокона Лебеда во временном окне ± 12 часов относительно времени прихода нейтринного события. При поиске в окне ± 15 дней было обнаружено два фотонноподобных события, о чем и говорилось во втором сообщении. Более подробную информацию о критериях отбора в фотонные кандидаты, а также их поиске от астрофизических источников можно найти в работах [35, 36]. Дальнейший анализ выполнялся для набора данных, начиная с 7 апреля 2018 года и по настоящее время. Для анализа брался круг с угловым радиусом 4.7° , что соответствует угловому разрешению установки «Ковер-2», 86 % C.L. В качестве центра круга был выбран источник Кокон Лебеда (4FGL J2028.6+4110e), являющийся наиболее вероятным источником зарегистрированного нейтрино.

Для всего набора данных превышение зарегистрированных событий над фоном не наблюдалось, поэтому был получен верхний предел для интегрального потока гамма-излучения с энергией более 300 ТэВ: $I_\gamma(E_\gamma > 300 \text{ ТэВ}) < 2.6 \cdot 10^{-13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (95 C.L.).

При анализе события вокруг нейтринного события был получен сигнал, который может быть интерпретирован как возможная вспышка. Всего от региона с центром в Коконе Лебеда было зарегистрировано более 350 событий, причем пять из них соответствуют фотонным кандидатам. Для оценки статистической значимости возможной вспышки

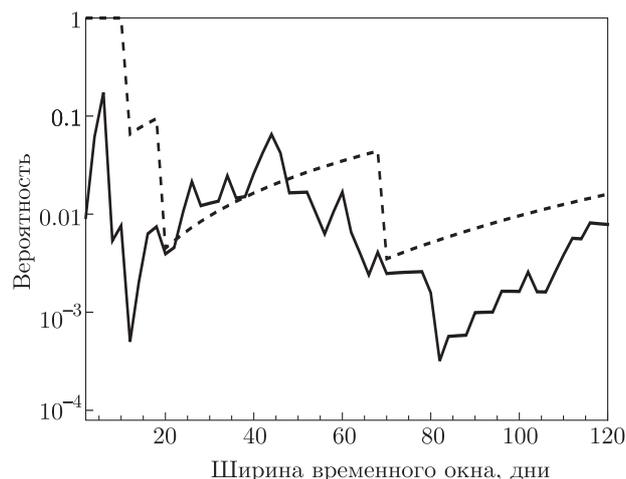


Рис. 8. Зависимость вероятности от ширины окна с центром, отсчитанным относительно времени прихода нейтрино. Сплошная линия соответствует всем событиям, штриховая — фотонным кандидатам

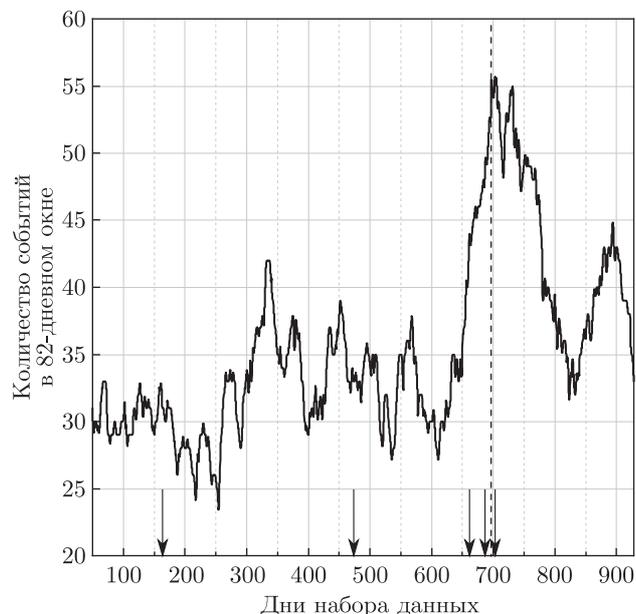


Рис. 9. Распределение всех событий во временном интервале шириной 82 дня. Стрелками показаны дни прихода фотонных кандидатов. Вертикальная пунктирная линия соответствует времени прихода нейтрино, 20 ноября 2020 г.

рассчитывалась вероятность для различных значений ширины временного окна, рис. 8. Было получено, что наибольшая статистическая значимость достигается при выборе временного окна шириной 82 дня. Распределение всех зарегистрированных событий для интервала шириной 82 дня, а также дни прихода фотонных кандидатов показаны на рис. 9.

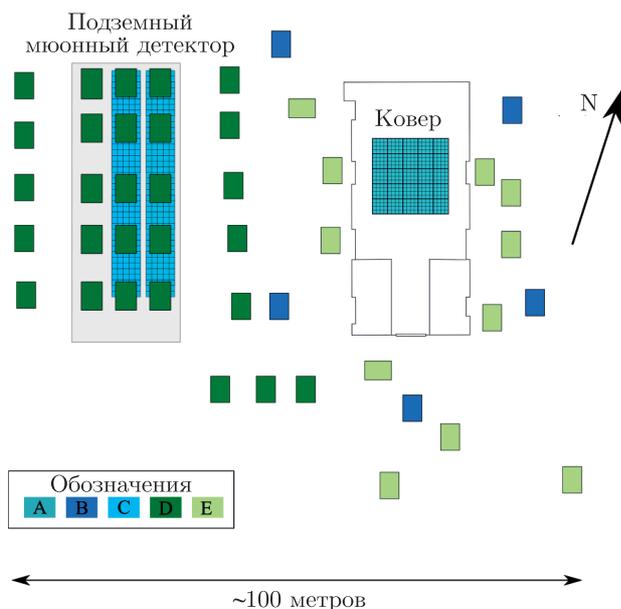


Рис. 10. Актуальная схема установки «Ковер-3». А — 400 счетчиков на основе жидкого сцинтиллятора общей площадью 196 м^2 . В — старые выносные пункты регистрации, 18 счетчиков на основе жидкого сцинтиллятора общей площадью 9 м^2 . С — подземный мюонный детектор, 410 счетчиков на основе пластикового сцинтиллятора площадью 410 м^2 . Новые выносные пункты регистрации установки «Ковер-3», 9 счетчиков на основе пластикового сцинтиллятора площадью 9 м^2 ; D — полностью оборудованные, предполагаемая дата запуска до конца 2021 года; E — будут введены в эксплуатацию до 2023 года

Можно заметить, что увеличение числа зарегистрированных событий, в том числе фотонных кандидатов, совпадает по времени с приходом нейтринного события.

В результате, для предоставленного на рис. 9 набора данных вероятность составляет $0.0031 (2.96\sigma)$ для всех зарегистрированных события и $0.0064 (2.73\sigma)$ для фотонных кандидатов. Несмотря на низкую статистическую значимость, совпадение с нейтринным событием позволяет говорить о наблюдении возможной вспышки в области Кокона Лебеда. Более подробную информацию, а также обсуждение и выводы можно найти в работе [15].

4. УСТАНОВКА «КОВЕР-3»

Установка «Ковер-3» является новым этапом в развитии установки, ее актуальная схема показана на рис. 10. Установка будет включать мюонный детектор (МД) общей площадью 410 м^2 , состоящий из 175 старых пластиковых сцинтилляционных счет-

чиков, работавших на установке «Ковер-2» и 235 новых. В отличие от старых счетчиков МД, для которых измерялось только энерговыделение, в новых дополнительно будет фиксироваться время прихода события с наносекундной точностью, что позволит исключать случайные события, не связанные с регистрируемым ШАЛ. В будущем, до конца 2023 года, планируется объединить все 410 счетчиков единой системой сбора данных на основе аналогово-цифровых преобразователей (АЦП) фирмы Саеп, которые будут записывать формы импульсов анодных сигналов. Наземная часть установки будет состоять из шести старых выносных пунктов регистрации (ВПП) и 39 новых. Новые ВПП будут состоять из девяти пластиковых сцинтилляционных счетчиков, таких же как и в МД, площадью 9 м^2 . Толщина сцинтиллятора равна пяти сантиметрам, что соответствует наиболее вероятному энерговыделению около 10 МэВ при прохождении вертикальной заряженной частицы. Анодные сигналы ФЭУ с девяти счетчиков будут поступать на суммирующий трансформатор. Суммированный сигнал с каждого ВПП по коаксиальному кабелю будет доставляться в аппаратный зал на систему сбора данных.

Данная конфигурация позволит значительно повысить чувствительность и эффективность установки. Так, предварительно оцениваемая чувствительность к диффузному гамма-излучению показана на рис. 7.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установка «Ковер» активно работала по программе гамма-астрономии сверхвысоких энергий в 1980 годы. Она участвовала в кампании по наблюдению источника Лебедь X-3, установив верхний предел на поток от этого источника, который опроверг результаты некоторых групп, получавших положительные результаты и значимые цифры потоков. Верхние пределы были получены и для некоторых других точечных объектов (Her X-1, Mrk 421). Но наиболее интригующими результатами были две вспышки от двух известных источников, значимость которых была увеличена сопутствующими наблюдениями других установок: радиотелескопами и черенковским телескопом в случае источника Лебедь X-3 и тремя независимыми установками для регистрации ШАЛ в случае Крабовидной туманности. Наблюдения в новой конфигурации «Ковер-2» также позволили установить верхний предел на поток диффузного

космического гамма-излучения с энергией более 300 ТэВ и получить указания на возможную вспышку, ассоциированную с одним из нейтринных событий детектора IceCube. Последнее заставляет с оптимизмом смотреть в будущее нового эксперимента «Ковер-3».

Финансирование. Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, контракт 075-15-2020-778 Программы крупных научных проектов в рамках национального проекта «Наука». Работа выполнена на УНУ Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп, ЦКП Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. V. V. Alexeenko, A. E. Chudakov, Ya. S. Elensky et al., *Il Nuovo Cimento* **10**, 151 (1987).
2. M. G. Aartsen, R. Abbasi, Y. Abdou et al., *Science* **342**, (2013).
3. O. Kalashev and S. Troitsky, *JETP Lett.* **100**, 761 (2014).
4. R. Maze and A. Zawadzki, *Il Nuovo Cimento* **17**, 625 (1960).
5. L. Kuzmichev, I. Astapov, P. Bezyazeev et al., *Nucl. Instrum. Meth. A* **952**, 161830 (2020).
6. Z. Cao, *Nature Astron.* **5**, 849 (2021).
7. T. Sako, *PoS ICRC2021*, 733 (2021).
8. P. K. Mohantya, S. R. Dugada U. D. Goswamia et al., *Astropart. Phys.* **31**, 24 (2009).
9. M. Amenomori, Y. W. Bao, X. J. Bi et al., *Phys. Rev. Lett.* **123**, 051101 (2019).
10. A. U. Abeysekara, A. Albert, R. Alfaro et al., *Astrophys. J.* **881**, 134 (2019).
11. A. U. Abeysekara, A. Albert, R. Alfaro et al., *Nature Astron.* **5**, 465 (2021).
12. M. Ackermann, M. Ajello, A. Allafort et al., *Science* **334**, 1103 (2011).
13. M. Amenomori, Y. W. Bao, X. J. Bi et al., *Phys. Rev. Lett.* **126**, 141101 (2021).
14. Z. Cao, F. A. Aharonian, Q. An et al., *Nature* **594**, 33 (2021).
15. D. D. Dzhappuev, Yu. Z. Afashokov, I. M. Dzaparova et al., *Astrophys. J. Lett.* **916**, L22 (2021).
16. J. Szabelski, *Nucl. Phys. B-Proc. Sup.* **196**, 371 (2009).
17. Е. Н. Алексеев, П. Я. Глемба, А. С. Лидванский и др., *Изв. АН СССР, сер. физ.* **40**, 994 (1976).
18. V. V. Alexeenko, A. E. Chudakov, N. S. Khaerdinov et al., *Proc. 19th ICRC (La Jolla, USA, August 11-23, 1985)*, **1**, 91 (1985).
19. В. В. Алексеев, В. Н. Бакаганов, Д. Д. Джаппуев и др., *Препринт ИЯИ РАН — 1109* (2003).
20. E. E. Becklin, G. Neugebauer, F. J. Hawkins et al., *Nature* **245**, 302 (1973).
21. R. Hjellming, M. Hermann, and E. Webster, *Nature* **237**, 507 (1972).
22. J. C. A. Miller-Jones, K. M. Blundell, M. P. Rupen et al., *Astrophys. J.* **600**, 368 (2004).
23. M. Tavani, A. Bulgarelli, G. Piano et al., *Nature* **462**, 620 (2009).
24. V. Berezhinsky, *Nature* **334**, 506 (1988).
25. H. S. Rawat, V. K. Senecha, R. C. Rannot et al., *Astrophys. Space. Sci.* **151**, 149 (1989).
26. N. Gehrels, *Astrophys. J.* **303**, 336 (1986).
27. Y. Muraki, S. Shibata, T. Aoki et al., *Astrophys. J.* **373**, 657 (1991).
28. S. Corbel, G. Dubus, J. A. Tomsick et al., *Astrophys. J.* **421**, 2947 (2012).
29. V. V. Alexeenko, Y. M. Andreyev, A. E. Chudakov et al., *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **18**, L83 (1992).
30. B. Acharya, M. Rao, K. Sivaprasad et al., *Nature* **347**, 364 (1990).
31. M. Aglietta, B. Alessandro, G. Badino et al., *Europhys. Lett.* **15**, 81 (1991).
32. Д. Д. Джаппуев, В. В. Алексеев, В. И. Волченко и др., *Известия РАН, сер. физ.* **71**, 542 (2007).
33. V. V. Alexeenko, N. A. Alexeenko, E. N. Alexeyev, et al., *Proc. 23rd ICRC (Alberta, Canada, July 19-30, 1993)* **2**, 477 (1993).
34. В. Б. Петков, Д. Д. Джаппуев, А. С. Лидванский и др., *Изв. РАН Сер. Физ.* **83**, 1038 (2019).
35. S. Troitsky, D. Dzhappuev, and Y. Zhezher, *PoS ICRC2019*, 808 (2019).
36. D. D. Dzhappuev, I. M. Dzaparova, E. A. Gorbacheva et al., *JETP Lett.* **109**, 226 (2019).