

КОМПЛЕКСНАЯ ЛИВНЕВАЯ УСТАНОВКА «КОВЕР-3» БАКСАНСКОЙ НЕЙТРИННОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ИЯИ РАН. ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ГАММА-АСТРОНОМИИ

В. Б. Петков^{1,}, И. А. Вайман¹, Н. А. Васильев²,
Е. А. Горбачева¹, Д. Д. Джаппуев¹, Т. А. Джатдоев^{1,2},
И. М. Дзапарова¹, К. В. Журавлева¹, И. С. Карпиков¹,
Н. Ф. Клименко¹, А. У. Куджаев¹, А. Н. Куреня¹,
А. С. Лидванский¹, О. И. Михайлова¹, Е. И. Подлесный³,
Н. А. Позднухов¹, В. С. Романенко^{1,4}, Г. И. Рубцов¹,
С. В. Троицкий^{1,2}, И. Б. Унатлоков¹, М. М. Хаджиев¹,
А. Ф. Янин¹*

¹ Институт ядерных исследований РАН, Москва

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

³ Норвежский университет науки и технологий, Тронхейм, Норвегия

⁴ Адыгейский государственный университет, Майкоп, Россия

В настоящее время в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН создается комплексная ливневая установка «Ковер-3», расположенная на высоте 1700 м над уровнем моря и предназначенная для регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ) космических лучей в диапазоне первичных энергий от 10 ТэВ до 10 ПэВ. Наличие в составе установки подземного мюонного детектора общей площадью 410 м² позволяет с высокой эффективностью отделять ливни, рожденные первичными гамма-квантами сверхвысоких энергий, от обычных ШАЛ, образованных первичными протонами и ядрами. Одной из основных задач установки является измерение характеристик высокоэнергетического гамма-излучения космического происхождения. Представлены описание и характеристики установки, а также результаты исследований в области гамма-астрономии.

The Carpet-3 complex EAS array is under construction now in the Baksan Neutrino Observatory of the INR RAS. The array is located at an altitude of 1700 m above sea level and designed to record extensive air showers (EAS) of cosmic rays in the primary energy range from 10 TeV to 10 PeV. The underground muon detector with a total area of 410 m² allows for highly efficient separation of showers generated by primary gamma quanta of ultra-high energies from ordinary EAS formed by

* E-mail: vpetkov@inr.ru

primary protons and nuclei. One of the main tasks of the EAS array is to measure the characteristics of high-energy gamma radiation of cosmic origin. The description and characteristics of the EAS array "Carpet-3", as well as the obtained research results in the field of gamma-ray astronomy, are presented.

PACS: 96.50.sd

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальная задача поиска первичных гамма-квантов при энергиях ≥ 100 ТэВ решается с помощью установок, регистрирующих широкие атмосферные ливни (ШАЛ) космических лучей. Трудность заключается в выделении ливней, вызванных первичными фотонами, на фоне ливней, вызванных протонами и ядрами. Одним из наиболее характерных параметров, позволяющих определять тип первичных частиц, является полное число мюонов в ШАЛ. Как правило, ливень, вызванный фотоном, содержит значительно меньше мюонов, чем ливень, вызванный первичным адроном. Это различие связано с тем, что фотонный ливень развивается в основном за счет электромагнитного взаимодействия и мюоны могут возникать в нем только за счет фотоядерных реакций. Ливни от первичных адронов и ядер, наоборот, имеют большее количество мюонов, которые генерируются в ходе распадов заряженных пионов, рождаемых в адронных реакциях. Метод выделения гамма-ливней от обычных ШАЛ с помощью отбора бедных мюонами ливней давно известен и уже применялся, в частности, в нашем предыдущем эксперименте на установке «Ковер-2». Установка «Ковер-3» является дальнейшим развитием ливневой установки «Ковер-2», которая продолжает работать до сих пор, являясь в то же время частью новой установки.

УСТАНОВКИ «КОВЕР» И «КОВЕР-2»

Установка «Ковер» введена в строй достаточно давно, в 1974 г. [1, 2]. Она расположена на высоте 1700 м над уровнем моря, что соответствует глубине в атмосфере 840 г/см^2 . Центральная часть установки находится в здании под крышей толщиной 29 г/см^2 и состоит из 400 жидкостных сцинтилляционных счетчиков, расположенных в виде квадрата со стороной 14 м и непрерывной площадью 196 м^2 . Стандартный сцинтилляционный детектор представляет собой алюминиевый контейнер размерами $0,7 \times 0,7 \times 0,3$ м, заполненный жидким сцинтиллятором на основе уайт-спирита. В шести выносных пунктах (ВП) с тонкой крышей (около $1,2 \text{ г/см}^2$) находятся 108 таких же счетчиков (в каждом по 18), общая площадь ВП составляет 54 м^2 . Изначально эта установка создавалась как многоцелевой детектор космических лучей, она неоднократно модернизировалась, расширялась и продолжает функционировать по нескольким научным программам. Благодаря большой непрерывной

площади установки и достаточно малой ячеистой структуре (площадь индивидуального детектора $\sim 0,5 \text{ м}^2$) на установке «Ковер» в предыдущие годы был проведен ряд экспериментов, внесших определенный вклад в физику космических лучей, в том числе поиск источников γ -квантов сверхвысоких энергий [3].

Для отделения ливней, рожденных первичными фотонами, от ливней, рожденных первичными протонами и ядрами, в составе установки был создан мюонный детектор (МД), для размещения которого были построены три подземных туннеля размерами $5,5 \times 42 \text{ м}$ каждый, общий центр МД расположен на расстоянии 48 м от центра «Ковра». Толщина грунта над МД около 500 г/см^2 , что примерно соответствует пороговой энергии 1 ГэВ для вертикальных мюонов. В 1999 г. начала работу первая очередь МД площадью 175 м^2 , размещенных в центральном тоннеле и состоящих из 175 счетчиков на основе пластического сцинтиллятора площадью 1 м^2 и толщиной 5 см. Сцинтиллятор просматривается одним фотоэлектронным умножителем ФЭУ-49Б. Каждый индивидуальный счетчик измеряет энерговыделение в диапазоне 0,5–100 релятивистских частиц (р. ч.), где 1 р. ч. — наиболее вероятное энерговыделение в сцинтилляторе счетчика от одиночных мюонов (для данного типа счетчика 1 р. ч. соответствует 10 МэВ). Большая площадь МД и большое количество индивидуальных счетчиков дают возможность изучать структуру проникающей компоненты космических лучей. В данной конфигурации установка получила название «Ковер-2».

НАБЛЮДЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ КОСМИЧЕСКОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ «КОВЕР»

На установке «Ковер» в 1980-х гг. были проведены наблюдения источника Лебедь X-3 и некоторых других возможных источников космического гамма-излучения сверхвысокой энергии. Для источника Лебедь X-3 в течение одного года наблюдений не было обнаружено абсолютного увеличения числа ливней из области источника, а небольшой пик на фазовой диаграмме показал только ограниченную статистическую значимость. Для этого источника был установлен верхний предел на поток гамма-излучения сверхвысоких энергий и были опровергнуты результаты нескольких установок, получивших ранее значимые цифры потоков. Однако в октябре 1985 г., во время радиовспышки из Лебеда X-3, были получены значительные превышения над фоном в течение трех суток (максимальный эффект (40%) наблюдался 14 октября), которые были интерпретированы как вспышки гамма-излучения сверхвысокой энергии [4]. На тот момент данные установки «Ковер» не могли быть рассмотрены как убедительное доказательство вспышки в источнике Лебедь X-3, так как подтверждения от других аналогичных экспериментов не было. Но следует отметить, что в июне 1989 г. японской

ливневой установкой Опуа был зарегистрирован [5] избыток фотонов сверхвысоких энергий с высокой статистической значимостью, который также совпал по времени с мощной вспышкой в радиодиапазоне. А относительно недавние наблюдения вспышки гамма-излучения орбитальной гамма-обсерваторией Fermi/LAT во время гигантской радиовспышки привели к выводам об общем происхождении всех нетепловых компонентов в источнике Лебедь X-3 [6].

Вспышка гамма-излучения сверхвысоких энергий от Крабовидной туманности была зарегистрирована на установке «Ковер» 23 февраля 1989 г. Это событие было обнаружено по значительному суточному превышению числа зарегистрированных ШАЛ над фоном, который был набран в течение предыдущих лет [7, 8]. Данная вспышка также была зарегистрирована и другими установками, а именно KGF в Индии [9] и EAS-TOР в Италии [10]. Эти три наблюдения в среднем отделены друг от друга двумя часами, и измеренные тремя установками потоки фотонов сверхвысоких энергий указывают на быстрое начало всплеска с последующим снижением средней интенсивности в течение 8 ч комбинированных наблюдений.

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ГАММА-АСТРОНОМИИ НА УСТАНОВКЕ «КОВЕР-2»

Использование мюонного детектора площадью 175 м² позволило на установке «Ковер-2» отобрать обедненные мюонами ШАЛ с целью выделения событий — кандидатов в ШАЛ от первичных фотонов сверхвысокой энергии. До 2018 г. информация с МД записывалась при условии прохождения через МД двух и более мюонов, что и определило в этот период порог 1 ПэВ для первичных фотонов. С 2018 г. запись информации с МД проводилась по общему ливневому триггеру установки, что позволило регистрировать ливни с нулевым числом мюонов в МД и опустить порог по энергии первичных фотонов до $\simeq 100$ ТэВ.

Для отбора кандидатов в ливни от первичных фотонов были использованы два метода. В первом методе для выделения ливней от первичных гамма-квантов из фона обычных ШАЛ проводится анализ корреляционной зависимости зарегистрированных и смоделированных событий в плоскости $n_\mu - N_e$, где N_e — полное число заряженных частиц в ливне, а n_μ — число зарегистрированных в МД мюонов. Выделяя различные области в плоскости $n_\mu - N_e$, можно с различной эффективностью (которая определяется по результатам моделирования) отбирать ливни от первичных гамма-квантов [11, 12]. Во втором методе для разделения первичных фотонов и адронов используется подход так называемой фотонной медианы: по смоделированным от первичных фотонов событиям строится распределение по отношению n_μ/N_e и определяется медианное

значение этого отношения. К кандидатам в ливни от первичных фотонов относятся те ливни, для которых значение n_{μ}/N_e ниже медианного [13].

Применение этих методов разделения ливней позволило не только существенно уменьшить фон при поиске источников космического гамма-излучения, но и провести на установке «Ковер-2» поиск космического диффузного гамма-излучения сверхвысокой энергии [14]. Интерес к поиску изотропного диффузного гамма-излучения в ПэВ-ной области энергий определяется важностью этого излучения для тестирования моделей происхождения астрофизических нейтрино высоких энергий. По измерениям на установке «Ковер-2» были получены ограничения на поток космического диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий $10^{14} - 10^{16}$ эВ [11, 12, 15].

В большинстве астрофизических моделей, где нейтрино высоких энергий образуются в результате распадов заряженных π -мезонов, которые всегда сопровождаются π^0 -мезонами, также рождаются гамма-кванты высоких энергий. Поиск первичных фотонов с энергией выше 1 ПэВ, связанных по направлению с нейтрино высоких энергий, зарегистрированных нейтринным телескопом IceCube, был проведен по данным установки «Ковер-2» за 3080 сут чистого времени набора информации (за период с 1999 по 2011 г.), получены ограничения на потоки таких фотонов [13].

По данным установки за 2,5 года набора информации был проведен поиск фотонов с энергиями в диапазоне от 100 ТэВ до нескольких петаэлектронвольт, приходящих в совпадении по направлению и времени с алертами от НАВС (ТэВ — гамма-лучи) и IceCube (нейтрино выше ~ 100 ТэВ). Никакого значительного превышения количества фотон-кандидатов не наблюдалось, получены верхние пределы на флюенсы гамма-излучения сверхвысокой энергии от этих событий [16].

В ноябре 2020 г. нейтринная обсерватория IceCube сообщила о регистрации нейтрино с энергией ~ 150 ТэВ из области Кокона Лебеда — одного из самых перспективных галактических пэватронов. В эксперименте «Ковер-2» был обнаружен избыток ШАЛ с этого направления, согласующегося со вспышкой в течение нескольких месяцев в фотонах выше 300 ТэВ, во временном совпадении с данным нейтринным событием [17]. Плотность потока гамма-излучения имеет тот же порядок, что и ожидаемая из наблюдения нейтрино в предположении стандартного механизма рождения нейтрино. Это наблюдение можно рассматривать как первое подтверждение совместного образования нейтрино высоких энергий и гамма-лучей в галактическом источнике.

Зарегистрированный 9 октября 2022 г. астрофизический транзиент Swift J1913.1+1946, вскоре идентифицированный с обнаруженным Fermi GBM гамма-всплеском GRB 221009A, рассматривается в настоящее время как наиболее яркий гамма-всплеск за весь период наблюдений. Главной особенностью данного транзиента является наличие чрезвычайно энергичных гамма-лучей, никогда не регистрируе-

мых ранее от гамма-всплесков. В том числе на установке «Ковер-2» был обнаружен фотоноподобный ШАЛ с энергией ~ 230 ТэВ через 4536 с после триггера [18]. В настоящее время продолжается работа по уточнению параметров зарегистрированного установкой события и его интерпретации. Следует отметить, что если это событие действительно вызвано гамма-квантом от гамма-всплеска GRB 221009A, вспыхнувшего в другой галактике на расстоянии, соответствующем красному смещению $z = 0,151$, то это событие можно объяснить только наличием новой физики, например нарушением лоренц-инвариантности или фотон-аксионными осцилляциями.

УСТАНОВКА «КОВЕР-3»

Комплексная ливневая установка «Ковер-3» Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН является дальнейшим развитием установок «Ковер» и «Ковер-2», которые фактически входят в состав новой установки [19]. Установка расположена на высоте 1700 м над уровнем моря и предназначена для регистрации ШАЛ космических лучей в диапазоне первичных энергий от ~ 30 ТэВ до 10 ПэВ. Наличие в составе установки подземного мюонного детектора общей площадью 410 м² позволяет с высокой эффективностью разделять ливни, рожденные различными первичными частицами, в том числе отделять ливни, рожденные первичными гамма-квантами сверхвысоких энергий, от обычных ШАЛ, образованных первичными протонами и ядрами.

Схема установки «Ковер-3» приведена на рисунке. В состав наземной части установки «Ковер-3» входят собственно установка «Ковер» и выносные пункты регистрации (ВПР) площадью 9 м² каждый. Конструкция установок «Ковер» позволяет проводить дополнительную режекцию фоновых адронных ШАЛ по измерениям флуктуаций плотности частиц. Сейчас в работе участвуют пять из шести старых ВПР (обозначены В). Новые ВПР представляют собой фургоны из сэндвич-панелей, внутри которых располагаются по девять сцинтилляционных счетчиков на основе пластического сцинтиллятора общей площадью 9 м², система терморегуляции, источники питания и регистрирующая электроника. В настоящее время установлены 39 ВПР (обозначены D и E), из них 35 (обозначены D) полностью укомплектованы сцинтилляционными счетчиками и проходят стадию наладки оборудования, а оставшиеся четыре (обозначены E) будут укомплектованы в ближайшее время. В дальнейшем планируется расширить наземную часть установки, добавив еще 21 ВПР (обозначены F). Это позволит увеличить эффективную площадь регистрации ШАЛ до $\sim 10^4$ м², что примерно в 50 раз больше эффективной площади установки «Ковер-2». Установка «Ковер-3» в ее финальной конфигурации будет иметь, по предварительным оценкам, угловое разрешение $\sim 1^\circ$ и регистрировать ШАЛ от первичных фотонов с энергией ≥ 30 ТэВ.

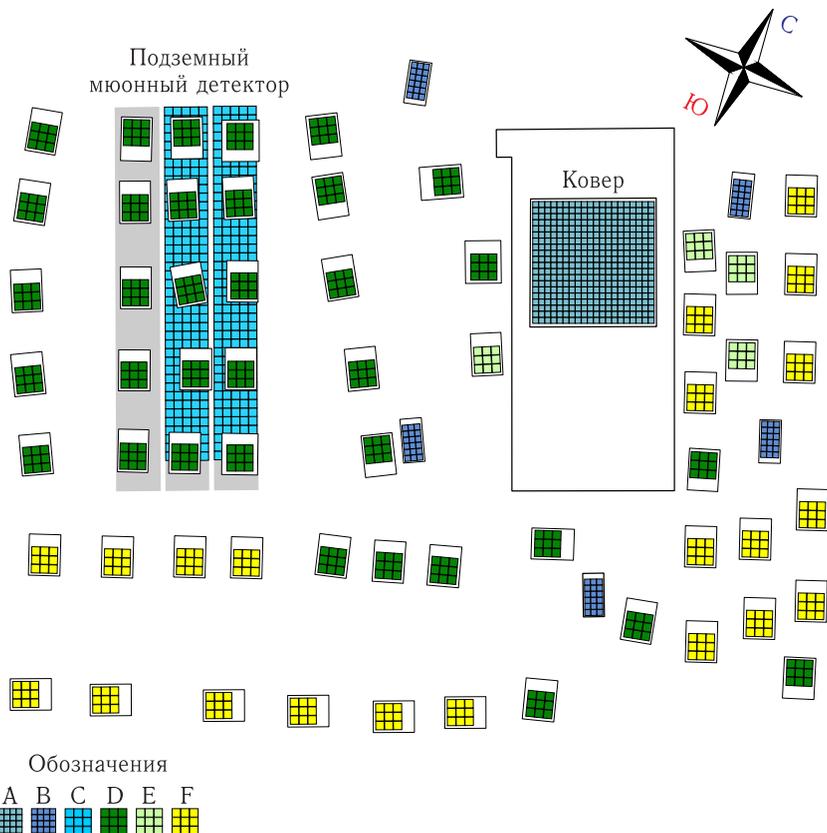


Схема установки «Ковер-3»: А — центральная установка «Ковер»; В — пять выносных пунктов регистрации на основе жидкого сцинтиллятора; С — подземный мюонный детектор; D и E — выносные пункты регистрации на основе пластического сцинтиллятора (полностью укомплектованные — D и без сцинтилляционных детекторов — E); F — планируемые к установке ВП

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерение характеристик высокоэнергетического гамма-излучения космического происхождения в настоящее время рассматривается в качестве основной задачи установки «Ковер-3». Будут проводиться: поиск фотонов с энергией ≥ 100 ТэВ от транзитных астрофизических объектов (в том числе по алертам от международной сети AMON/GCN); поиск высокоэнергетического космического гамма-излучения от областей локализации нейтрино высокой энергии, зарегистрированных нейтринными телескопами IceCube и Baikal-GVD; поиск высокоэнергетического

излучения от областей локализации гравитационно-волновых событий и космических гамма-всплесков.

Как показали результаты установки «Ковер-2» по регистрации гамма-излучения сверхвысокой энергии из области Кокона Лебеда и от гамма-всплеска GRB 221009A, при изучении транзиентных астрофизических объектов относительно небольшие ливневые установки, удаленные по географической долготе, могут дать важные результаты даже при наличии крупных установок, подобных LHAASO.

Финансирование. Данная работа выполнена на УНУ «Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп» (ЦКП Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН) и финансировалась за счет средств федерального бюджета.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Е.Н., Алексеев В.В., Воеводский А.В., Глемба П.Я., Дадькин 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., Татьян 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. 48. С. 1097–1100.
2. Алексеев Е.Н., Глемба П.Я., Лидванский А.С., Марков В.Я., Молчанова Н.И., Татьян 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. С. 994–997.
3. Романенко В.С., Петков В.Б., Лидванский А.С. Гамма-астрономия сверхвысоких энергий на установке «Ковер» Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН // ЖЭТФ. 2022. Т. 161, вып. 4. С. 523–532.
4. Alexeenko V. V., Chudakov A. E., Elensky Ya. S., Khaerdinov N. S., Lidvansky A. S., Metlinsky N. I., Ozrokov S. Kh., Sklyarov V. V., Tizengauzen V. A., Navarra G. Cygnus X-3 Observation in Gamma-Ray Energy Range $> 10^{14}$ eV // Nuovo Cim. C. 1987. V. 10, Iss. 2. P. 151–161.
5. Muraki Y., Shibata S., Aoki T., Mitsui K., Okada A., Ohashi Y., Kobayakawa K., Kojima H., Kitamura T., Kato Y., Takahashi T., Nakamura I. Observations of Ultra-High-Energy Photons from Cygnus X-3 // Astrophys. J. 1991. V. 373. P. 657–664.
6. Corbel S., Dubus G., Tomsick J. A., Szostek A., Corbet R. H. D., Miller-Jones J. C. A., Richards J. L., Pooley G., Trushkin S., Dubois R., Hill A. B., Kerr M., Max-Moerbeck W., Readhead A. C. S., Bodaghee A., Tudose V., Parent D., Wilms J., Pottschmidt K. A Giant Radio Flare from Cygnus X-3 with Associated γ -Ray Emission // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2012. V. 421. P. 2947–2955.

7. 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.
8. Alexeenko V. V., Andreyev Y. M., Chudakov A. E., Elensky Y. S., Lidvansky A. S., Ozrokov S. K., Stenkin Y. 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. L83–L88.
9. 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. 364–365.
10. Aglietta M., Alssandro B., Badino G., Bergamasco L., Castagnoli C., Castellina A., Cattadori C., Cini G., D’Ettorre Piazzoli B., Fulgione W., Galeotti P., Ghia P. L., Mannocchi G., Morello C., Navarra G., Periale L., Riccati L., Saavedra O., Trinchero G. C., Vallania P., Vernetto S. Detection of the UHE Burst from the Crab Nebula on February 23, 1989, from the EAS-TOP Array // Europhys. Lett. 1991. V. 15. P. 81–86.
11. Dzhappuev D. D., Petkov V. B., Lidvansky A. S., Volchenko V. I., Volchenko G. V., Gorbacheva E. A., Dzaparova I. M., Klimenko N. F., Kudzhaev A. U., Kurenya A. N., Mikhailova O. I., Ptitsyna K. V., Khadzhiyev 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. 012028.
12. Петков В. Б., Джэппуев Д. Д., Лидванский А. С., Горбачева Е. А., Дзапарова И. М., Куджаев А. У., Клименко Н. Ф., Куреня А. Н., Михайлова О. И., Хаджиев М. М., Янин А. Ф. Измерение верхнего предела потока изотропного диффузного гамма-излучения с энергией выше 700 ТэВ на установке «Ковер-2» // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83, № 8. С. 1038–1041.
13. Dzhappuev D. D., Dzaparova M., Gorbacheva E. A., Karpikov I. S., Khadzhiyev M. M., Klimenko N. F., Kudzhaev A. U., Kurenya A. N., Lidvansky A. S., Mikhailova O. I., Petkov V. B., Ptitsyna K. V., Romanenko V. S., Rubtsov G. I., Troitsky S. V., Yanin A. F., Zhezher Ya. V. Carpet-2 Search for PeV Gamma Rays Associated with IceCube High-Energy Neutrino Events // JETP Lett. 2019. V. 109, No. 4. P. 226–231.
14. Dzhappuev D. D., Dzaparova I. M., Gorbacheva E. A., Karpikov I. S., Khadzhiyev M. M., Klimenko N. F., Kudzhaev A. U., Kurenya A. N., Lidvansky A. S., Mikhailova O. I., Petkov V. B., Ptitsyna K. V., Romanenko V. S., Rubtsov G. I., Troitsky S. V., Yanin A. F., Zhezher Ya. V. Search for Astrophysical PeV Gamma Rays from Point Sources with Carpet-2 // Eur. Phys. J. Web Conf. 2019. V. 207. 03004.
15. Dzhappuev D. D., Afashkov Yu. Z., Dzaparova I. M., Dzhatdov T. A., Gorbacheva E. A., Karpikov I. S., Khadzhiyev M. M., Klimenko N. F., Kudzhaev A. U., Kurenya A. N., Lidvansky A. S., Mikhailova O. I., Petkov V. B., Podlesnyi E. I., Pozdnukhov N. A., Romanenko V. S., Rubtsov G. I., Troitsky S. V., Unatlov I. B., Vaiman I. A., Yanin A. F., Zhuravleva K. V. Upper Limits on the Isotropic Diffuse Flux of Cosmic PeV Photons from Carpet-2 Observations // JETP. Lett. 2023. V. 117. P. 184–188.

16. *Dzhappuev D. D., Afashokov Yu. Z., Dzaparova I. M., Gorbacheva E. A., Karpikov I. S., Khadzhiev M. M., Klimenko N. F., Kudzhaev A. U., Kurenya A. N., Lidvansky A. S., Mikhailova O. I., Petkov V. B., Romanenko V. S., Rubtsov G. I., Troitsky S. V., Unatlov I. B., Yanin A. F., Zhezher Ya. V., Zhuravleva K. V.* Carpet-2 Search for Gamma Rays above 100 TeV in Coincidence with HAWC and IceCube Alerts // *JETP Lett.* 2020. V. 112, No. 12. P. 753–756.
17. *Dzhappuev D. D., Afashokov Yu. Z., Dzaparova I. M., Dzhatdov T. A., Gorbacheva E. A., Karpikov I. S., Khadzhiev M. M., Klimenko N. F., Kudzhaev A. U., Kurenya A. N., Lidvansky A. S., Mikhailova O. I., Petkov V. B., Podlesnyi E. I., Romanenko V. S., Rubtsov G. I., Troitsky S. V., Unatlov I. B., Vaiman I. A., Yanin A. F., Zhezher Ya. V., Zhuravleva K. V.* Observation of Photons above 300 TeV Associated with a High-Energy Neutrino from the Cygnus Region // *Astrophys. J. Lett.* 2021. V. 916. L22.
18. *Dzhappuev D. D., Afashokov Yu. Z., Dzaparova I. M., Dzhatdov T. A., Gorbacheva E. A., Karpikov I. S., Khadzhiev M. M., Klimenko N. F., Kudzhaev A. U., Kurenya A. N., Lidvansky A. S., Mikhailova O. I., Petkov V. B., Podlesnyi E. I., Pozdnukhov N. A., Romanenko V. S., Rubtsov G. I., Troitsky S. V., Unatlov I. B., Vaiman I. A., Yanin A. F., Zhezher Ya. V., Zhuravleva K. V.* Swift J1913.1 + 1946/GRB 221009A: Detection of a 250-TeV Photon-Like Air Shower by Carpet-2 // *The Astronomer's Telegram.* 2022. 15669.
19. *Kudzhaev A. U., Dzhappuev D. D., Afashokov Yu. Z., Dzaparova I. M., Gorbacheva E. A., Karpikov I. S., Khadzhiev M. M., Klimenko N. F., Kurenya A. N., Lidvansky A. S., Mikhailova O. I., Petkov V. B., Romanenko V. S., Rubtsov G. I., Yanin A. F., Zhezher Ya. V.* The Carpet-3 EAS Array for Investigation of Gamma-Radiation with Energy $E > 100$ TeV // *Phys. At. Nucl.* 2021. V. 84, No. 6. P. 1030–1036.