ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2021, том 85, № 4, с. 545–547

УДК 52-728:53.05:52-13

ЭКСПЕРИМЕНТ “КОВЕР-3”: ПОИСК ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕРХВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ ОТ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

© 2021 г. В. С. Романенко[1, *], В. Б. Петков[1, 2], Ю. З. Афашоков[1], Е. А. Горбачева[1], Д. Д. Джаппуев[1], И. М. Дзапарова[1, 2, 3], Я. В. Жежер[1], К. В. Журавлева[1], И. С. Карпиков[1], А. У. Куджаев[1], Н. Ф. Клименко[1], А. Н. Куреня[1], А. С. Лидванский[1], О. И. Михайлова[1], Г. И. Рубцов[1], С. В. Троицкий[1], И. Б. Унатлоков[1], М. М. Хаджиев[1], А. Ф. Янин[1, 3]

[1]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия*

[2]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия*

[3]*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга, Москва, Россия*

**E-mail: vsrom94@gmail.com*

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.
После доработки 19.11.2020 г.
Принята к публикации 28.12.2020 г.

Установка “Ковер-3” Баксанской нейтринной обсерватории предназначена для регистрации широких атмосферных ливней, образованных первичным космическим излучением с энергией более 100 ТэВ. Основной целью является поиск космического гамма-излучения сверхвысоких энергий. Описано текущее состояние установки, а также результаты поиска фотонов сверхвысоких энергий от областей локализации кандидатов в гравитационно-волновые события, зарегистрированных LIGO/Virgo в третьем наблюдательном периоде.

DOI: 10.31857/S0367676521040335

ВВЕДЕНИЕ

Ливневая установка “Ковер-3” Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований РАН является новым этапом в развитии установки “Ковер” [1]. Установка “Ковер” была одной из первых установок для решения задач гамма-астрономии сверхвысоких энергий и состояла из 400 жидких сцинтилляционных счетчиков, занимавших непрерывную площадь 196 м^2, и шести выносных пунктов площадью 9 м^2 каждый, предназначенных для определения направления прихода ШАЛ. Среди ее основных результатов – регистрация вспышки в области энергий более 100 ТэВ от пульсара в Крабовидной туманности 23 февраля 1989 г. [2]. Данное событие было подтверждено другими установками, с различным уровнем достоверности: Kolar Gold Fields [3] и EAS-TOP [4]. Впоследствии на установке “Ковер” были установлены верхние пределы на потоки гамма-излучения сверхвысоких энергий [5] для трех различных источников: Лебедь X-3, Крабовидной туманности и Геркулес X-1. После введения в строй мюонного детектора площадью 175 м^2 и нейтронного монитора установка получила название “Ковер-2” [6]. По экспериментальным данным установки “Ковер-2” были получены ограничения на потоки диффузного гамма-излучения с энергией выше 700 ТэВ, на потоки гамма-излучения с энергией выше 1 ПэВ от направлений прихода нейтрино высоких энергий, зарегистрированных IceCube, и от ряда астрофизических источников (Crab, Cyg X-3, Mrk 421 and Mrk 501) [7–10].

ДИФФУЗНОЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ

Толчком к развитию гамма-астрономии сверхвысокой энергии послужили результаты нейтринной обсерватории IceCube. В работе [11] сообщили о регистрации астрофизических нейтрино в области энергий от 30 до 1200 ТэВ, причем временных и пространственных корреляций между событиями не наблюдалось, что не позволило идентифицировать их источники. В более поздних работах [12, 13] говорилось о регистрации высокоэнергичных нейтрино с направления на блазар TXS 0506 + 056, а в работе [14] можно найти более подробную информацию о поиске точечных источников нейтрино по данным IceCube за 10 лет. На данный момент точечные источники не могут полностью объяснить потоки астрофизических нейтрино, зарегистрированных

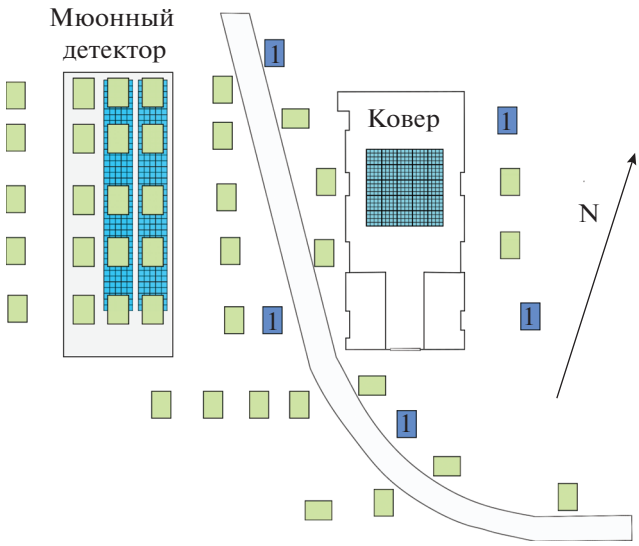

Рис. 1. Схема установки “Ковер-3”. 1 – выносные пункты регистрации, 18 счетчиков на основе жидкого сцинтиллятора; прямоугольниками без подписи обозначены новые выносные пункты регистрации, 9 счетчиков на основе пластического сцинтиллятора.

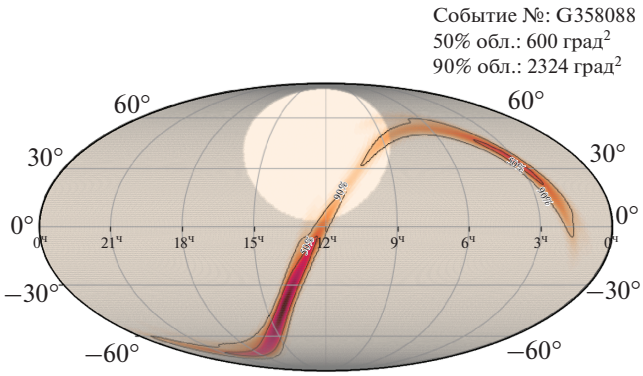

Рис. 2. Пример локализации гравитационно-волнового события на небесной сфере. Светлым выделено поле зрения установки.

IceCube, поэтому были предложены различные модели их происхождения, см., напр., обзоры [15, 16]. Наиболее вероятно, что такие нейтрино рождаются в распадах, заряженных $\pi^{\pm}$ мезонов, появляющихся в адронных или фотоадронных процессах высоких энергий (см., например, [17]). Эти $\pi^{\pm}$ мезоны должны сопровождаться нейтральными π^0 мезонами, распадающимися на два фотона. Таким образом, фотоны высоких энергий, если они не поглощаются, должны сопровождать нейтрино, зарегистрированные обсерваторией IceCube. Однако, на данный момент не было представлено достоверной информации о регистрации такого диффузного гамма-излучения.

Поэтому для задач гамма-астрономии в области энергий более 100 ТэВ, в том числе поиска диффузного гамма-излучения, необходимо создание ливневых установок, включающих мюонный детектор, необходимый для регистрации мюонной компоненты ШАЛ, с целью последующего разделения ливней, вызванных первичными адронами и фотонами. К классу таких установок относится “Ковер-3”, основной целью которого является поиск диффузного гамма-излучения с энергией более 100 ТэВ, оценка чувствительности к которому приведена в работе [7].

УСТАНОВКА “КОВЕР-3”

Планируется, что в 2021 году установка “Ковер-3” будет работать в расширенной конфигурации, показанной на рис. 1. В состав установки входит собственно “Ковер”, состоящий из 400 счетчиков на основе жидкого сцинтиллятора общей площадью 197 м^2, пять выносных пунктов, состоящих из 18 счетчиков на основе жидкого сцинтиллятора, площадью 9 м^2 каждый и тридцать девять пунктов регистрации, с детекторами на основе пластического сцинтиллятора, площадью 9 м^2 каждый.

Подземный мюонный детектор в настоящее время имеет площадь 410 м^2 и состоит из двух параллельных туннелей, в каждом из которых находится по 205 сцинтилляционных счетчиков на основе пластического сцинтиллятора площадью 1 м^2 каждый. Толщина грунта над мюонным детектором составляет 2.5 м, что соответствует пороговой энергии 1 ГэВ для вертикальных мюонов.

До введения в эксплуатацию всех пунктов регистрации, изображенных на рис. 1, для восстановления параметров и отбора кандидатов в гамма ливни используются алгоритмы и критерии, описанные в [7]. Новые алгоритмы обработки будут разработаны на основе Монте-Карло моделирования и тестового набора данных для полной конфигурации установки.

ПОИСК ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ГРАВИТАЦИОННО ВОЛНОВЫХ СОБЫТИЙ

В третьем наблюдательном периоде гравитационно-волновые антенны LIGO и Virgo зарегистрировали 56 кандидатов в гравитационно-волновые события [18]. Для дальнейшего анализа из них были отобраны 10 событий, в момент регистрации которых на установке “Ковер-3” шел набор информации, и для которых область локализации события находилась в поле зрения установки (в пределах зенитного угла $\theta = 40°$). В качестве примера на рис. 2 приведены области локализации гравитационно-волнового события S191222n [19] и поле зрения установки “Ковер-3” (выделено светлым) в момент регистрации этого события. Поиск ливней от первичных гамма-квантов сверхвысокой энергии на установке проводился в преде-

лах ±500 с относительно времени регистрации событий LIGO/Virgo [20]. Для отбора таких ливней использовались те же критерии, которые применялись ранее при поиске гамма-излучения сверхвысокой энергии от астрофизических источников в работах [8–10]. В пределах ±500 с относительно времени регистрации отобранных 10 событий LIGO/Virgo не было обнаружено ливней от первичных гамма-квантов сверхвысокой энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Запуск набора экспериментальных данных в полной конфигурации, указанной на рис. 1, состоится в 2021 г. Основными задачами работы установки будут являться поиск диффузного гамма-излучения с энергиями свыше 100 ТэВ, а также поиск новых и изучение существующих точечных источников. Проведен поиск фотонов сверхвысоких энергий от областей локализации кандидатов в гравитационно-волновые события, зарегистрированных LIGO/Virgo в третьем наблюдательном периоде. Ливней от первичных фотонов сверхвысокой энергии в совпадении с кандидатами в гравитационно-волновые события обнаружено не было.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 19-29-11027 и 20-32-90213). Работа выполнена на уникальной научной установке Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп, Центр коллективного пользования Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Alexeenko V.V., Andreyev Yu.M., Chudakov A.E. et al.* // AIP Conf. Proc. 1991. V. 220. P. 132.
2. *Alexeenko V.V., Andreyev Yu.M., Chudakov A.E. et al.* // J. Phys. G. 1992. V. 18. P. 83.
3. *Sinha S., Acharya B.S., Bhat P.N. et al.* // Proc. 21st ICRC (Adelaide, 1990). P. 366.
4. *Aglietta M., Alessandro B., Bandino G. et al.* // EPL. 1991. V. 15. P. 81.
5. *Alexeenko V.V., Andreyev Yu.M., Chudakov A.E. et al.* // Proc. 22nd ICRC. (Dublin, 1991). P. 289.
6. *Джаппуев Д.Д., Алексеенко В.В., Волченко В.И. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2007. Т. 71. С. 542; *Dzhappuev D.D., Alekseenko V.V., Volchenko V.I. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2007. V. 71. P. 542.
7. *Петков В.Б., Джаппуев Д.Д., Лидванский А.С. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. С. 1038; *Petkov V.B., Dzhappuev D.D., Lidvansky A.S. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. P. 941.
8. *Dzhappuev D.D., Dzaparova I.M., Gorbacheva E.A. et al.* // JETP Lett. 2019. V. 109. P. 226.
9. *Dzhappuev D.D., Dzaparova I.M., Gorbacheva E.A. et al.* // EPJ Web Conf. 2019. V. 207. Art. No. 03004.
10. *Dzhappuev D., Troitsky S., Zhezher Y. et al.* // Proc. 36th ICRC. (Madison, 2019). Art. No. 808.
11. *Aartsen M., Abbasi R., Abdou Y. et al.* // Science. 2013. V. 342. Art. No. 1242856.
12. *Aartsen M., Ackermann M., Adams J. et al.* // Science. 2018. V. 361. No. 6398. Art. No. 147.
13. *Aartsen M., Ackermann M., Adams J. et al.* // Science. 2018. V. 361. No. 6398. Art. No. eaat1378.
14. *Aartsen M., Ackermann M., Adams J. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2020. V. 124. Art. No. 051103.
15. *Ahlers M., Halzen F.* // Prog. Part. Nucl. Phys. 2018. V. 102. P. 73.
16. *Palladino A., Spurio M., Vissani F.* // Universe. 2020. V. 6. P. 30.
17. *Kalashev O., Troitsky S.* // JETP Lett. 2015. V. 100. P. 761.
18. https://gracedb.ligo.org/superevents/public/O3.
19. https://gracedb.ligo.org/superevents/S191222n/view.
20. *Baret B., Bartos I., Bouhou B. et al.* // Astropart. Phys. 2011. V. 35. P. 1.

The Carpet-3 experiment: ultra-high energy gamma-ray search from astrophysical sources

V. S. Romanenko[a, *], V. B. Petkov[a, b], Yu. Z. Afashokov[a], I. M. Dzaparova[a, b, c], D. D. Dzhappuev[a], E. A. Gorbacheva[a], I. S. Karpikov[a], M. M. Khadziev[a], N. F. Klimenko[a], A. U. Kudzhaev[a], A. N. Kurenya[a], A. S. Lidvansky[a], O. I. Mikhailova[a], G. I. Rubtsov[a], S. V. Troitsky[a], I. B. Unatlokov[a], A. F. Yanin[a, c], Ya. V. Zhezher[a], K. V. Zhuravleva[a]

[a] *Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Science, Moscow, 117312 Russia*
[b] *Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia*
[c] *Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119992 Russia*
**e-mail: vsrom94@gmail.com*

The Carpet-3 installation of the Baksan Neutrino Observatory is designed to register extensive air showers generated by primary cosmic radiation with an energy of more than 100 TeV. The main goal is to search for cosmic gamma radiation of ultrahigh energies. This paper describes the current state of the facility, as well as the results of the search for ultrahigh-energy photons from the regions of localization of candidates for gravitational-wave events recorded by LIGO/Virgo in the third observational period.