

УДК 537.591.15

ИЗМЕРЕНИЕ ВЕРХНЕГО ПРЕДЕЛА ПОТОКА ИЗОТРОПНОГО ДИФFUЗНОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ С ЭНЕРГИЕЙ ВЫШЕ 700 ТЭВ НА УСТАНОВКЕ “КОВЕР-2”

© 2019 г. В. Б. Петков^{1,2,*}, Д. Д. Джаппуев¹, А. С. Лидванский¹, Е. А. Горбачева¹,
И. М. Дзапарова^{1,2}, А. У. Куджаев¹, Н. Ф. Клименко¹, А. Н. Куреня¹,
О. И. Михайлова¹, М. М. Хаджиев¹, А. Ф. Янин¹

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

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

*E-mail: vpetkov@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

В Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН проводится подготовка эксперимента по измерению потока космического диффузного гамма-излучения с энергией гамма-квантов выше 100 ТэВ (эксперимент “Ковер-3”). Подготовка эксперимента предполагает увеличение площади мюонного детектора и наземной части ливневой установки. В работе для различных конфигураций установки приведена оценка чувствительности эксперимента к ливням от первичных гамма-квантов. По экспериментальным данным установки “Ковер-2” за 9.2 г. чистого времени набора информации получены предварительные оценки верхнего предела потока космического диффузного гамма-излучения с энергией выше 700 ТэВ.

DOI: 10.1134/S0367676519080325

ВВЕДЕНИЕ

Измерение потока и спектра диффузного гамма-излучения космического происхождения с энергий выше 100 ТэВ представляет значительный интерес для решения проблемы происхождения космических лучей, одной из центральных в астрофизике высоких энергий. В отличие от космических лучей (протонов и ядер более тяжелых элементов), которые являются заряженными частицами и отклоняются в межзвездных магнитных полях, первичные гамма-кванты дают информацию о пространственном распределении и характеристиках мест ускорения космических лучей и также о плотности космических лучей в межзвездном пространстве. Исследование диффузного космического гамма-излучения при таких энергиях проводится методом ШАЛ в экспериментах, в которых можно отделить ливни, рожденные первичными фотонами, от ливней, рожденных первичными протонами и ядрами. 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. Впервые возможность отбора ливней от первичных гамма-квантов данным методом была предложена в работе [1].

После этого было проведено много экспериментов по поиску гамма-ливней в широком энергетическом диапазоне, обзор по которым приводится в работах [2–5]. По результатам экспериментов на установках Mt. Chacaltaya, Тянь-Шань, Якутск, Lodz были сделаны утверждения о регистрации гамма-ливней в области энергий 10^{14} – 5×10^{17} эВ. Надо заметить, что эти результаты имели незначительную статистическую значимость, и в дальнейшем их результаты не подтвердились. В последующих экспериментах на установках EAS-TOPO, CASA-MIA и KASCADE поиск первичных гамма-квантов был проведен в области энергий 3×10^{14} – 5×10^{16} эВ; а для энергий свыше 10^{18} эВ – на установках Haverah Park, AGASA, Якутск, Pierre Auger и Telescope Array. Во всех этих экспериментах были получены лишь верхние пределы на потоки, которые оказались гораздо ниже, чем потоки диффузного космического гамма-излучения, об измерении которых утвер-

ждалось в более ранних работах. В эксперименте МГУ поиск ливней от первичных гамма-квантов в области энергий $5 \times 10^{15} - 2 \times 10^{17}$ эВ проводился методом отбора безмюонных ливней. Во всей исследованной области энергий были получены ограничения на поток космического диффузного гамма-излучения, за исключением диапазона $5 \times 10^{16} - 10^{17}$ эВ. В этом диапазоне были зарегистрированы безмюонные ливни, число которых значительно превышало ожидаемое число фоновых событий, что позволило дать оценку потока диффузного гамма-излучения с такими энергиями. После обработки данных установки МГУ по другому алгоритму были получены результаты, не подтверждающие ранее полученные. Таким образом, результаты этого эксперимента также дают ограничение на верхние пределы потока диффузного гамма-излучения в энергетическом интервале $10^{16} - 10^{17}$ эВ. Следует заметить, что и в эксперименте KASCADE-Grande [6] для этого же диапазона первичных энергий также получены лишь ограничения на поток диффузного гамма-излучения.

Эксперимент по поиску локальных источников гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ проводился на установке “Ковер” Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН в 80-е гг. прошлого столетия. От Крабовидной туманности была зарегистрирована вспышка гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ [7], в то время как для других вероятных источников гамма-излучения были получены лишь верхние пределы на потоки гамма-квантов [8].

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 высокоэнергичные нейтрино астрофизического происхождения. В работе [9] было показано, что если такие нейтрино являются результатом распадов заряженных пионов в Галактике, то должны существовать и нейтральные пионы тех же энергий, распад которых даст заметный поток гамма-излучения в диапазоне энергий $10^{14} - 5 \times 10^{17}$ эВ. Предсказанный в этой работе поток космического диффузного гамма-излучения галактического происхождения близок к имеющимся экспериментальным ограничениям в диапазоне ниже примерно 5 ПэВ и может быть зарегистрирован в эксперименте “Ковер-3”.

ЭКСПЕРИМЕНТ “КОВЕР-2”

Ливневая установка “Ковер-2” [10, 11] состоит из наземной части — собственно установки “Ковер” с шестью выносными пунктами (ВП) — и подземного мюонного детектора (МД) площадью 175 м². Расстояние между центрами “Ковра” и

МД равно 48 м. Электронно-фотонная компонента ШАЛ регистрируется установкой “Ковер”, состоящей из 400 сцинтилляционных счетчиков на основе жидкого сцинтиллятора, расположенных в виде квадрата площадью 196 м². В каждом из ВП находится по 18 таких же счетчиков, как и на Ковре, площадь каждого ВП — 9 м².

Мюонная компонента с энергией выше 1 ГэВ регистрируется мюонным детектором, состоящим из 175 сцинтилляционных счетчиков на основе пластического сцинтиллятора площадью 1 м² каждый. Анодные импульсы ФЭУ этих детекторов объединены по 35 шт. в пяти аналоговых сумматорах. Сигналы с сумматоров подаются на входы ЗЦП (зарядово-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 и 50 МэВ для счетчиков Ковра и ВП). Импульсы с ЗЦП подаются на вход схемы отбора событий (СОС), которая при наличии 2-х и более импульсов на входе вырабатывает выходной триггерный сигнал МД. Этот сигнал разрешает системе сбора МД запись информации о событии в МД с энерговыделением ≥ 2 р. ч.

Сигналы с выносных пунктов используются для определения направления прихода ливней. Для ШАЛ с осями в “Ковре” точность определения координат осей не хуже 0.7 м, а точность измерения направления прихода ливней $\approx 3^\circ$.

Установки “Ковер” и МД работают независимо друг от друга и их системы регистрации имеют разное мертвое время. Т. к. временные метки событий в МД и Ковре вырабатываются одними часами, это позволяет проводить идентификацию совпавших событий во временном интервале $\Delta t = 1$ мс.

Для определения энергии первичной частицы используется экспериментально измеряемая по данным Ковра характеристика ШАЛ — полное число релятивистских частиц в ливне, N_{ch} , а для оценки числа мюонов в МД, n_μ , используется величина энерговыделения в сцинтилляционных счетчиках МД, выраженная в числе р. ч. В обработку включены события, удовлетворяющие следующим условиям:

- 1) оси ливней находятся в пределах Ковра;
- 2) зенитные углы ливней $\theta < 40^\circ$;
- 3) суммарное энерговыделение в Ковре $\geq 10^4$ р. ч.;
- 4) число сработавших с порогом 10 р. ч. счетчиков в Ковре ≥ 300 .

Из всех зарегистрированных за период с 1999 г. по 2011 г. ШАЛ после такого отбора осталось около 1.3×10^5 ливней. Чистое время набора информации составляет 3390 сут (≈ 9.2 г.).

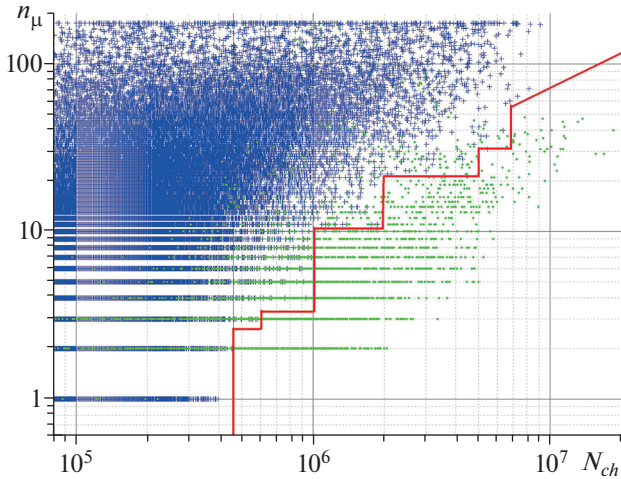


Рис. 1. Корреляционная зависимость зарегистрированных и смоделированных событий $n_\mu - N_{ch}$. Синие крестики – экспериментальные результаты, зеленые кружки – модельные данные.

Для оценки эффективности отбора гамма-ливней были смоделированы ливни от первичных протонов и гамма-квантов с использованием пакета программ CORSIKA v. 6720 (модель QGSJET01C для высоких энергий и FLUKA 2006 – для низких) [12]. По результатам моделирования с учетом отклика установки для применяемых в данном эксперименте условий отбора были получены зависимости: N_{ch} от первичной энергии E_0 , n_μ от E_0 и N_{ch} , используемые в дальнейшем анализе. Были вычислены эффективности регистрации и восстановления параметров (в том числе N_{ch}) зарегистрированных ливней, $\epsilon_\gamma(E_0)$.

ОГРАНИЧЕНИЕ НА ПОТОК ДИФFUЗНОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Для выделения ливней от первичных гамма-квантов из фона обычных ШАЛ проводится анализ корреляционной зависимости зарегистрированных и смоделированных событий в плоскости $n_\mu - N_{ch}$ [13]. В данной работе в этой плоскости выделены области, в которых есть только события от смоделированных гамма-ливней, при отсутствии зарегистрированных в эксперименте ШАЛ. На рис. 1 граница этой области для $N_e \geq 4.5 \times 10^5$ ($E_0 \geq 700$ ТэВ) выделена ломаной линией. Исходя из того, что в выделенной области отсутствует зарегистрированные события (т.е. отсутствует фон), можно использовать следующую формулу для оценки верхнего предела на поток первичных гамма-квантов на 90% доверительном уровне:

$$I_\gamma(>E_0) = \frac{n_{90}}{S\Omega T\epsilon_1(>E_0)\epsilon_2(>E_0)},$$

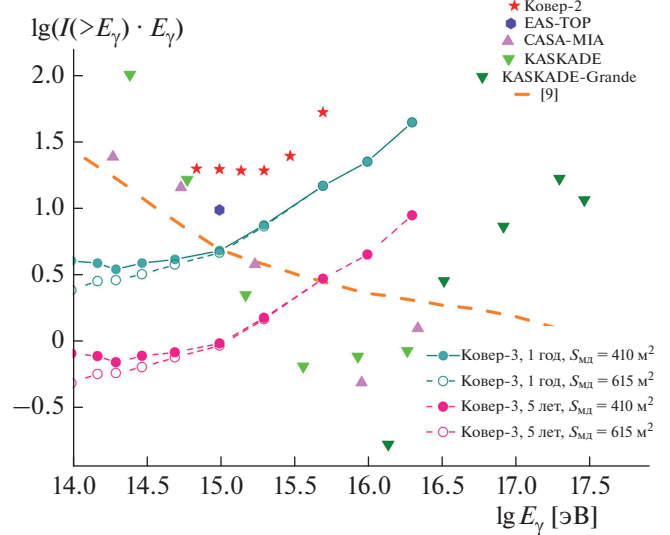


Рис. 2. Зависимость интегрального потока от пороговой энергии гамма-квантов. Пояснения см. в тексте.

где $n_{90} = 2.3$, $S \cdot \Omega \cdot T = 6.2 \cdot 10^{14}$ см² · стер · с, $\epsilon_1(>E_0)$ – эффективность регистрации и восстановления параметров зарегистрированных ливней:

$$\epsilon_1(>E_0) = \frac{\int_{E_0}^{\infty} \epsilon_\gamma(E_0) J_\gamma(E_0) dE_0}{\int_{E_0}^{\infty} J_\gamma(E_0) dE_0},$$

здесь $J_\gamma(E_0)$ – степенной энергетический спектр первичных гамма-квантов, с показателем степени 2.0. Эффективность $\epsilon_2(>E_0)$ отбора ливней от первичных гамма-квантов с энергией больше некоторой E_0 вычисляется по следующей формуле:

$$\epsilon_2(>E_0) = \frac{N_{select}(>E_0)}{N_{tot}(>E_0)},$$

где $N_{tot}(>E_0)$ – полное число смоделированных событий, а $N_{select}(>E_0)$ – число смоделированных событий в выделенной области (ниже ломаной линии). Аналогично были получены ограничения еще для 5-и значений E_0 . Полученные в нашем эксперименте ограничения на интегральный поток космического диффузного гамма-излучения в зависимости от энергии первичных фотонов приводятся на рис. 2 вместе с результатами других экспериментов. Следует заметить, что представленные в данной работе результаты являются пока предварительными, и приведенные ограничения на поток космического диффузного гамма-излучения будут уточнены при более тщательном анализе экспериментальных данных.

ЭКСПЕРИМЕНТ “КОВЕР-3”

Эксперимент “Ковер-3” предполагает поэтапное увеличение площади наземной и подземной частей функционирующей установки “Ковер-2”. В настоящее время в подземных тоннелях МД уже установлены 410 сцинтилляционных счетчиков с общей непрерывной площадью 410 м², которые полностью укомплектованы электроникой. Ведется работа по наладке электроники сцинтилляционных счетчиков и созданию системы сбора информации для данной конфигурации МД. Для увеличения площади наземных детекторов над подземным помещением МД установлены семь модулей, в пяти из которых размещены по 9 сцинтилляционных счетчиков площадью 1 м² каждый.

Были проведены расчеты эффективности отбора гамма-ливней для установки “Ковер-3” с площадью МД ($S_{\text{МД}}$), равной 410 и 615 м². На рис. 2 приведены ожидаемые ограничения на поток космического диффузного гамма-излучения для двух конфигураций установки “Ковер-3” и для двух значений времени набора информации. Как видно, даже при площади МД 410 м² новая установка будет иметь наилучшую чувствительность к потоку первичных гамма-квантов с энергиями в диапазоне 100 ТэВ–1 ПэВ.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №№ 16-02-00687 и 16-29-13049) на уникальной научной установке Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп (в состав которой входит “Ковер-2”) Центра коллективного пользования Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Maze R., Zawadzki A.* // Nuovo Cim. 1960. V. 17. P. 625.
2. *Фомин Ю.А., Калмыков Н.Н., Куликов Г.В. и др.* // ЖЭТФ. 2013. Т. 144. С. 1153; *Fomin Yu.A., Kalmykov N.N., Kulikov G.V. et al.* // JETP. 2013. V. 117. P. 1011.
3. *Фомин Ю.А., Калмыков Н.Н., Куликов Г.В., Троицкий С.В.* // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 100. № 11. С. 797; *Fomin Yu.A., Kalmykov N.N., Kulikov G.V., Troitsky S.V.* // JETP Lett. 2015. V. 100. P. 699.
4. *Fomin Yu.A., Kalmykov N.N., Karpikov I.S. et al.* // Astropart. Phys. 2017. V. 92. P. 1.
5. *Fomin Yu.A., Kalmykov N.N., Karpikov I. et al.* // Report INR RAS INR-TH-2017-005, М.: INR RAS, 2017.
6. *Kang D., Apel W.D., Arteaga-Velázquez J.C. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2015. V. 632. Art. № 012013.
7. *Alexeenko V.V., Andreyev Yu.M., Chudakov A.E. et al.* // J. Phys. G. 1992. V. 18. P. L83.
8. *Алексеев В.В., Лидванский А.С., Метлинский Н.А. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 1986. Т. 44. С. 202.
9. *Калашев О.Е., Троицкий С.В.* // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 100. № 12. С. 865; *Kalashov O.E., Troitsky S.V.* // JETP Lett. 2015. V. 100. P. 761.
10. *Джаппуев Д.Д., Алексеев В.В., Волченко В.И. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2007. Т. 71. № 4. С. 542; *Dzhappuev D.D., Alexeenko V.V., Volchenko V.I. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2007. V. 71. № 4. P. 524.
11. *Dzhappuev D.D., Alekseenko V.V., Lidvansky A.S. et al.* // Proc. 30th ICRC. (Merida, 2007). V. 4. P. 19.
12. *Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N. et al.* // Report FZKA 6019. Karlsruhe: Forschungszentrum, 1998. 90 p.
13. *Джаппуев Д.Д., Петков В.Б., Лидванский А.С. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 4. С. 461; *Dzhappuev D.D., Petkov V.B., Lidvansky A.S. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. № 4. P. 424.