

ЭКСПЕРИМЕНТ «КОВЕР-3»: ПОИСК ДИФFUЗНОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ С ЭНЕРГИЕЙ ВЫШЕ 100 ТэВ

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

Институт ядерных исследований РАН, Москва

В настоящее время 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 как мюонного детектора, так и наземной части ливневой установки. В работе приведена оценка чувствительности эксперимента к ливням от первичных гамма-квантов для различных конфигураций установки. По экспериментальным данным установки «Ковер-2» за 9,2 года чистого времени набора информации получены предварительные оценки верхнего предела потока космического диффузного гамма-излучения с энергией выше 930 ТэВ.

An experiment for measuring the flux of gamma rays of cosmic origin with energy above 100 TeV (the Carpet-3 experiment) is currently being prepared at the Baksan Neutrino Observatory. The experimental setup suggests substantial increase of the areas of both muon detector and surface air shower array. We present some results of calculations of selection efficiency of air showers from primary gamma rays for different configurations of the array. The preliminary values of upper limits on the flux of cosmic diffuse gamma rays with energy higher than 930 TeV are also presented, derived from experimental data of the Carpet-2 shower array for a net exposure time of 9.2 y.

PACS: 95.85.Ry

*E-mail: dzhappuev@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

Измерение потока и спектра диффузного гамма-излучения космического происхождения с энергией 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, а также о плотности космических лучей в межзвездном пространстве. Исследование космического диффузного 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, 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]. В работах по результатам экспериментов на установках Mt. Chacaltaya [2], «Тянь-Шань» [3], «Якутск» [4], Lodz [5] сделаны утверждения о регистрации гамма-ливней в области энергий 10^{14} – $5 \cdot 10^{17}$ эВ. Надо отметить, что полученные данные имели незначительную статистическую значимость и в дальнейшем они не подтвердились. В последующих экспериментах на установках EAS-TOP [6], CASA-MIA [7] и KASCADE [8] поиск первичных гамма-квантов был проведен в области энергий $3 \cdot 10^{14}$ – $5 \cdot 10^{16}$ эВ, а для энергий выше 10^{18} эВ — на установках Naverah Park [9], AGASA [10–12], «Якутск» [13, 14], Pierre Auger [15, 16] и Telescope Array [17]. Во всех этих экспериментах были получены лишь верхние пределы на потоки, и они оказались гораздо ниже, чем у потоков космического диффузного гамма-излучения, об измерении которых утверждалось в более ранних работах. В эксперименте МГУ [18, 19] поиск ливней от первичных гамма-квантов в области энергий $5 \cdot 10^{15}$ – $2 \cdot 10^{17}$ эВ проводился методом отбора безмюонных ливней. Во всей исследованной области энергий были получены ограничения на поток космического диффузного гамма-излучения, за исключением диапазона $5 \cdot 10^{16}$ – 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. Однако в работах [20, 21] данные установки МГУ обработаны по другому алгоритму и получены результаты, не подтверждающие более ранние данные. Таким образом, результаты этого эксперимента также

дают ограничение на верхние пределы потока диффузного гамма-излучения в энергетическом интервале 10^{16} – 10^{17} эВ. Следует отметить, что в эксперименте KASCADE-Grande [22] для этого же диапазона энергии первичных фотонов 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 1980-е гг. От Крабовидной туманности была зарегистрирована вспышка гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ [23], в то время как для других вероятных источников гамма-излучения были получены лишь верхние пределы на потоки гамма-квантов [24]. Интерес к поиску первичного гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ заметно возрос в последнее время в связи с результатами эксперимента IceCube, в котором были зарегистрированы высокоэнергетические нейтрино астрофизического происхождения. В работе [25] показано, что если такие нейтрино являются результатом распадов заряженных пионов в Галактике, то должны существовать и нейтральные пионы с теми же энергиями, распад которых даст заметный поток гамма-излучения в диапазоне энергий 10^{14} – $5 \cdot 10^{17}$ эВ. Предсказанный в этой работе поток диффузного гамма-излучения галактического происхождения близок к имеющимся экспериментальным ограничениям в диапазоне ниже примерно 5 ПэВ и может быть зарегистрирован в эксперименте «Ковер-3».

Ливневая установка «Ковер-2» [26, 27] Баксанской нейтринной обсерватории расположена на Северном Кавказе в Приэльбрусье на высоте 1700 м над уровнем моря (толщина атмосферы равна 840 г/см^2) (рис. 1). Геомагнитный порог обрезания равен 5,6 ГВ. Эта установка состоит из наземной части — собственно установки «Ковер» с шестью выносными пунктами (ВП) — и подземного мюонного детектора (МД) площадью 175 м^2 . 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 с непрерывной площадью 196 м^2 . В каждом из ВП находится по 18 таких же счетчиков, как и на «Ковре», площадь каждого ВП — 9 м^2 . Мюонная компонента с энергией выше 1 ГэВ регистрируется мюонным детектором, состоящим из 175 сцинтилляционных счетчиков на основе пластического сцинтиллятора площадью 1 м^2 каждый. Анодные импульсы ФЭУ этих детекторов объединены по 35 шт. в пяти аналоговых сумматорах. Сигналы с сумматоров подаются на входы зарядово-цифрового преобразователя (ЗЦП) с порогом 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). При наличии двух и более импульсов на входе СОС вырабатывается выходной триггерный сигнал. Этот сигнал разрешает запись информации о событии в системе сбора МД. Сигналы с шести

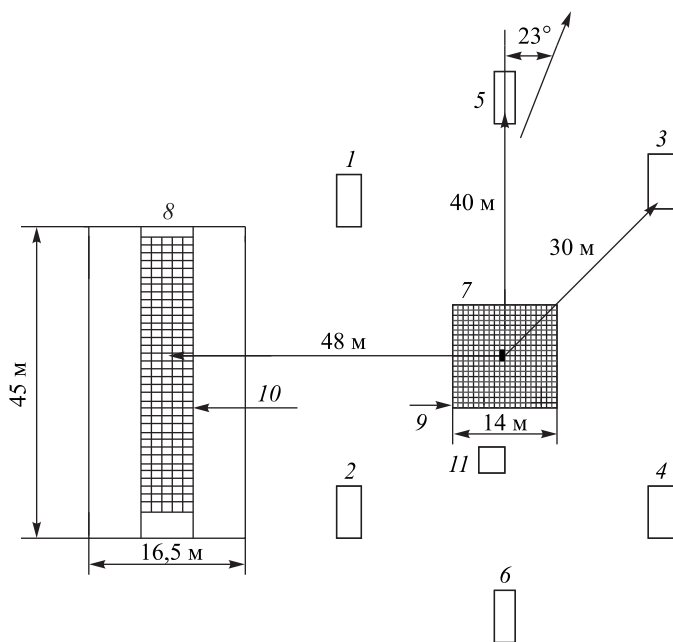


Рис. 1. Схема расположения детекторов установки «Ковер-2» на местности: 1–6 — выносные пункты; 7 — «Ковре»; 8 — мюонный детектор; 9 — жидкостные сцинтилляционные детекторы; 10 — пластиковые сцинтилляционные детекторы; 11 — нейтронный монитор

выносных пунктов используются для определения направления прихода ливней. Для ШАЛ с осями в «Ковре» точность определения координат осей не превышает 0,7 м, а точность измерения направления прихода ливней $\approx 3^\circ$. Установки «Ковре» и МД работают независимо друг от друга, и их системы регистрации имеют разное мертвое время. Так как 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 определяемая характеристика ШАЛ — полное число релятивистских частиц в «Ковре», N_e , 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 — 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 по 2011 г. ШАЛ после такого отбора осталось около $1,3 \cdot 10^5$ ливней. Чистое время набора информации равно 3390 сут ($\approx 9,2$ года). Для моделирования ливней используется пакет программ CORSIKA v. 6720 (модель QGSJET01C — для высоких энергий и FLUKA 2006 — для низких) [28]. Было смоделировано 5400 событий от первичных протонов и 815 событий от первичных гамма-квантов с энергиями в интервале 0,316–31,6 ПэВ. По результатам моделирования для первичных протонов и гамма-квантов получены зависимости N_e от энергии, а также зависимости n_μ от E_0 и N_e .

ОГРАНИЧЕНИЕ НА ПОТОК ДИФFUЗНОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Для выделения ливней от первичных гамма-квантов из фона обычных ШАЛ проведен анализ корреляционной зависимости в плоскости n_μ – N_e зарегистрированных и смоделированных событий (рис. 2). В данной работе мы анализируем область с $N_e \geq 6 \cdot 10^5$, в которой с применением способа обработки экспериментальных данных можно отделить смоделированные гамма-ливни от обычных ШАЛ.

Для оценки эффективности отбора гамма-ливней при $N_e \geq 6 \cdot 10^5$, $N_e \geq 10^6$ и $N_e \geq 5 \cdot 10^6$ на плоскости n_μ – N_e выделяется область расположения только смоделированных гамма-ливней, без наличия зарегистрированных ШАЛ. На рис. 2 граница этой области выделена ломаной линией.

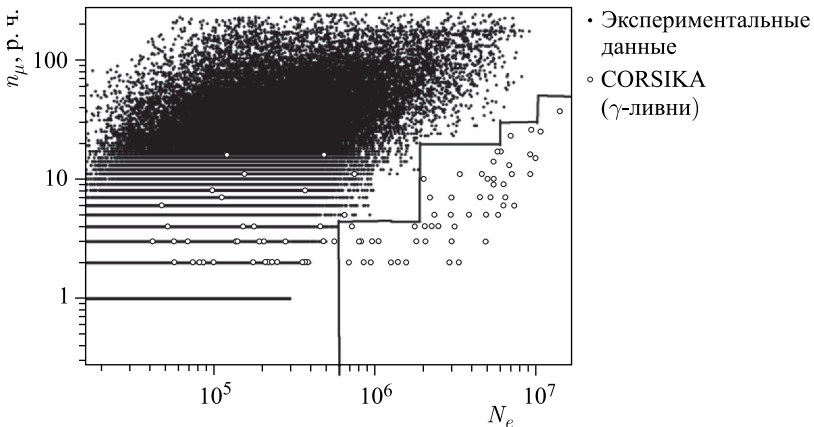


Рис. 2. Зависимость n_μ от N_e

Отношение числа смоделированных гамма-ливней, лежащих в этой области, к их полному числу при $N_e \geq 6 \cdot 10^5$, $N_e \geq 10^6$ и $N_e \geq 5 \cdot 10^6$ является эффективностью регистрации ливней ε_γ . Вычисленные таким образом значения ε_γ для трех интервалов N_e равны соответственно 0,95, 0,99 и 1. Исходя из того, что в выделенной области отсутствуют зарегистрированные события (т. е. отсутствует фон, $N_B = 0$), можно использовать следующую формулу для оценки верхнего предела на поток первичных гамма-квантов на 90%-м доверительном уровне:

$$I_\gamma = \frac{2,3}{ST\Omega\varepsilon_\gamma},$$

где $S = 200 \text{ м}^2$ — площадь регистрации осей ШАЛ; T — чистое время набора информации; ε_γ — эффективность регистрации ливней от первичных гамма-квантов. С использованием полученных значений эффективности определены верхние пределы для $E_\gamma \geq 9,3 \cdot 10^{14} \text{ эВ}$ ($N_e \geq 6 \cdot 10^5$), $E_\gamma \geq 1,3 \cdot 10^{15} \text{ эВ}$ ($N_e \geq 10^6$) и $E_\gamma \geq 3,2 \cdot 10^{15} \text{ эВ}$ ($N_e \geq 5 \cdot 10^6$) (таблица).

На рис. 3 приводятся полученные в нашем эксперименте ограничения на интегральный поток космического диффузного гамма-излучения в зависимос-

N_e	$E_\gamma, \text{эВ}$	N_B	ε_γ	$\log_{10}(E_\gamma I_\gamma(> E))$ [эВ · см ⁻¹ · с ⁻¹ · ср ⁻¹]
$\geq 6 \cdot 10^5$	$\geq 9,3 \cdot 10^{14}$	0	0,95	0,61
$\geq 10^6$	$\geq 1,3 \cdot 10^{15}$	0	0,99	0,85
$\geq 5 \cdot 10^6$	$\geq 3,2 \cdot 10^{15}$	0	1,0	0,92

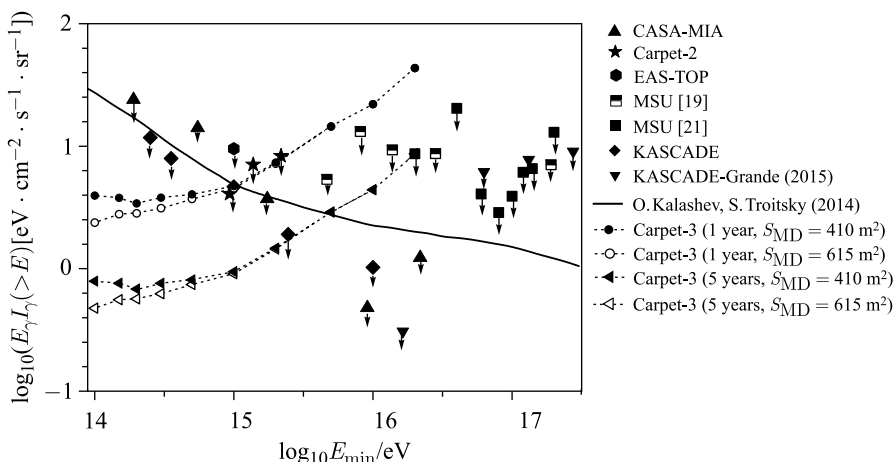


Рис. 3. Зависимость интегрального потока гамма-квантов от пороговой энергии гамма-квантов

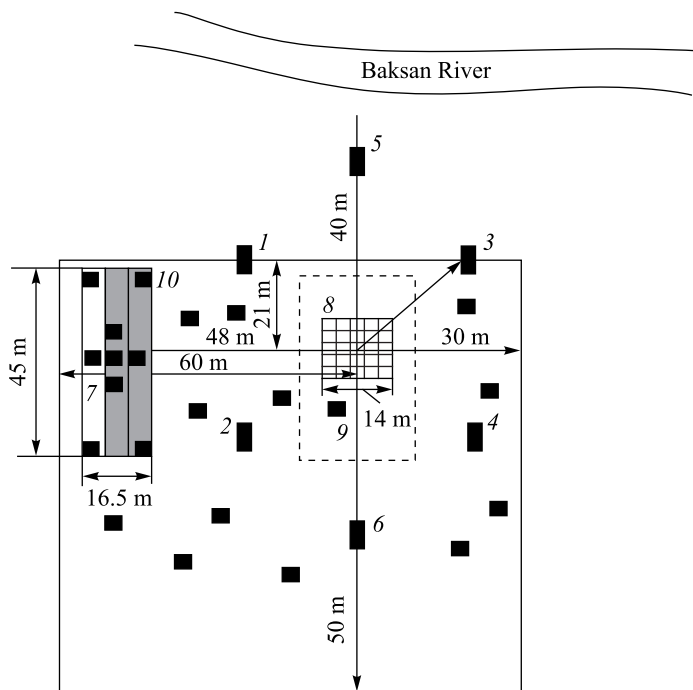


Рис. 4. Схема расположения детекторов установки «Ковер-3» на местности: 1–6 — выносные пункты; 7 — мюонный детектор; 8 — «Ковер»; 9 — нейтронный монитор; 10 — пластиковые сцинтилляционные счетчики МД; черные квадраты — дополнительные ливневые детекторы

ти от энергии первичных фотонов вместе с результатами других экспериментов. Следует отметить, что представленные в данной работе результаты являются предварительными и приведенные ограничения на поток космического диффузного гамма-излучения будут уточнены при более тщательном анализе экспериментальных данных.

Подготовка эксперимента предполагает поэтапное увеличение непрерывной площади МД сначала до 410 м^2 , а в дальнейшем — до 615 м^2 . Для увеличения площади регистрации осей ШАЛ будут дополнительно установлены 20 модулей, в которых размещены по девять сцинтилляционных счетчиков площадью 1 м^2 каждый (рис. 4). В настоящее время в подземных тоннелях МД уже установлены 410 сцинтилляционных счетчиков общей непрерывной площадью 410 м^2 , которые полностью укомплектованы электроникой. Ведется работа по наладке электроники сцинтилляционных счетчиков и созданию системы сбора информации для данной конфигурации МД.

Проведены расчеты эффективности отбора гамма-ливней и чувствительности различных конфигураций установки к ливням от первичных гамма-квантов. На рис. 3 приведены ожидаемые ограничения на поток космического диффузного гамма-излучения для двух конфигураций установки «Ковер-3» и 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам эксперимента «Ковер-2» получены ограничения на поток космического диффузного гамма-излучения с энергией выше 900 ТэВ. Для эффективной регистрации гамма-ливней с энергией выше 100 ТэВ необходимо провести модернизацию установки (эксперимент «Ковер-3»). В этом случае несколько лет набора информации позволят существенно улучшить имеющиеся в настоящее время результаты по измерению потока космического диффузного гамма-излучения с энергией 100 ТэВ.

Работа выполнена на УНУ Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп (ЦКП Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН) при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-29-13049-офи_м).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Maze R., Zawadzki A.* // Nuovo Cim. 1960. V. 17. P. 625.
2. *Suga K., Toyoda Y., Kamata K., Murakami K., Lapointe M., Gaebler J., Escobar I., Saavedra O., Domingo V., Shibata S., Akiyama H., Takano M., Uchino K.* // Astrophys. J. 1988. V. 326. P. 1036.
3. *Nikolsky S.I., Stamenov I.N., Ushev S.Z.* // J. Phys. G. 1987. V. 13. P. 883.
4. *Glushkov A.V., Efimov N.N., Efremov N.N., Makarov I.T., Praydin M.I., Dedenko L.I.* // Proc. of the 19th ICRC. La Jolla, 1982. V. 2. P. 186.
5. *Gawin J., Maze R., Wdowczyk J., Zawadzki A.* // Can. J. Phys. 1968. V. 46. P. 75.
6. *Aglietta M., Alessandro B., Antonioli P., Arneodo F., Bergamasco L., Bertaino M., Campos Fauth A., Castagnoli C., Castellina A., Chiavassa A., Cini Castagnoli G., D'Edorre Piazzoli B., Di Sciascio G., Fulgione W. (EAS-TOP Collab.)* // Astropart. Phys. 1996. V. 6. P. 71.
7. *Chantell M. C., Covault C. E., Cronin J. W., Fick B. E., Fortson L. F., Fowler J. W., Green K. D., Newport B. J., Ong R. A., Oser S., Catanese M. A., Glasmacher M. A. K., Matthews J., Nitz D. F., Sinclair D. (CASA-MIA Collab.)* // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 79. P. 1805; arXiv:astro-ph/9705246.

8. Schatz G., Feßler F., Antoni T., Apel W.D., Badea F., Bekk K., Bercuci A., Blümer H., Bozdog H., Brancus I.M., Büttner C., Chilingarian A., Daumiller K., Doll P., Engel R. (KASKADE Collab.) // Proc. of the 28th ICRC. Tsukuba, 2003. V. 4. P. 2293.
9. Ave M., Hinton J.A., Vazquez R.A., Watson A.A., Zas E. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 85. P. 2244; arXiv:astro-ph/0007386.
10. Shinozaki K., Chikawa M., Fukushima M., Hayashida N., Inoue N., Honda K., Kadota K., Kakimoto F., Kamata K., Kawaguchi S., Kawakami S., Kawasaki Y., Kawasumi N., Mahrous A.M., Mase K. (AGASA Collab.) // Astrophys. J. 2002. V. 571. P. L117.17.
11. Risse M., Homola P., Engel R., Góra D., Heck D., Pekala J., Wilczyńska B., Wilczyński H. // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 95. P. 171102; arXiv:astro-ph/0502418.
12. Rubtsov G.I., Dedenko L.G., Fedorova G.F., Fedunin E.Yu., Glushkov A.V., Gorbunov D.S., Makarov I.T., Pravdin M.I., Roganova T.M., Sleptsov I.E., Troitsky S.V. // Phys. Rev. D. 2006. V. 73. P. 063009; arXiv:astro-ph/0601449.
13. Glushkov A.V., Gorbunov D.S., Makarov I.T., Pravdin M.I., Rubtsov G.I., Sleptsov I.E., Troitsky S.V. // JETP Lett. 2007. V. 85. P. 131; arXiv:astro-ph/0701245.
14. Glushkov A.V., Makarov I.T., Pravdin M.I., Sleptsov I.E., Gorbunov D.S., Rubtsov G.I., Troitsky S.V. // Phys. Rev. D. 2010. V. 82. P. 041101; arXiv:0907.0374 [astro-ph/HE].
15. Abraham J., Abreu P., Aglietta M., Aguirre C., Allard D., Allekotte I., Allen J., Allison P., Alvarez-Muñiz J., Ambrosio M., Anchordoqui L., Andringa S., Anzalone A., Aramo C. (Pierre Auger Collab.) // Astropart. Phys. 2008. V. 29. P. 243; arXiv:0712.1147[astro-ph].
16. Bleve C. et al. (Pierre Auger Collab.) // Contributions to the 34th Intern. Cosmic Ray Conf. (ICRC 2015). 2015; arXiv:1509.03732[astro-ph.HE].
17. Rubtsov G.I., Fukushima M., Ivanov D., Piskunov M.S., Stokes B., Thomson G., Troitsky S.V. (Telescope Array Collab.) // Proc. of the 34th Intern. Cosmic Ray Conf. (ICRC 2015). 2015.
18. Fomin Yu.A., Kalmykov N.N., Kulikov G.V., Sulakov V.P., Troitsky S.V. // J. Exp. Theor. Phys. 2013. V. 117. P. 1011; arXiv:1307.4988[astro-ph.HE].
19. Fomin Yu.A., Kalmykov N.N., Kulikov G.V., Troitsky S.V. // JETP Lett. 2015. V. 100. P. 699; arXiv:1410.2599[astro-ph.HE].
20. Fomin Yu.A., Kalmykov N.N., Karpikov I.S., Kulikov G.V., Kuznetsov M.Yu., Rubtsov G.I., Sulakov V.P., Troitsky S.V. No Muon Excess in Extensive Air Showers at 100–500 PeV Primary Energy: EAS-MSU Results // Astropart. Phys. 2017. V. 92. P. 1; arXiv:1609.05764.
21. Fomin Yu.A., Kalmykov N.N., Karpikov I.S., Kulikov G.V., Kuznetsov M.Yu., Rubtsov G.I., Sulakov V.P., Troitsky S.V. Constraints on the Flux of $\sim 10^{16}$ – $10^{17.5}$ eV Cosmic Photons from the EAS-MSU Muon Data. Report INR RAS INR-TH-2017-005; arXiv:1702.08024.

22. Kang D., Apel W. D., Arteaga-Velázquez J. C., Bekk K., Bertaina M., Blümer J., Bozdog H., Brancus I. M., Cantoni E., Chiavassa A., Cossavella F., Daumiller K., de Souza V., Di Pierro F., Doll P., Engel R. // J. Phys. Conf. Ser. 2015. V. 632. P. 012013.
23. 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.
24. Алексеев В. В., Лидванский А. С., Метлинский Н. А., Озроков С. Х., Скляр В. В., Тизенгаузен В. А., Хаердинов Н. С., Чудаков А. Е. // Письма в ЖЭТФ. 1986. Т. 44. С. 202.
25. Kalashev O. E., Troitsky S. V. // JETP Lett. 2015. V. 100. P. 761; arXiv: 1410.2600.
26. Джаппуев Д. Д., Алексеев В. В., Волченко В. И., Волченко Г. В., Гулиев Ж. Ш., Гулиева Е. В., Коновалов Ю. Н., Куджаев А. У., Лидванский А. С., Михайлова О. И., Петков В. Б., Смирнов Д. В., Степанов В. И., Стенькин Ю. В., Хаердинов Н. С. // Изв. РАН. Сер. физ. 2007. Т. 71, № 4. С. 542.
27. Dzhappuev 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.
28. Heck D., Knapp J., Capdevielle J. N., Schatz G., Thouw T. Report FZKA 6019. Karlsruhe: Forschungszentrum, 1998.