

ПОИСК ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ФОТОНОВ И НЕЙТРИНО, ОБРАЗУЮЩИХ ШАЛ С ЭНЕРГИЕЙ ВЫШЕ $E > 10^{18}$ эВ И ЗЕНИТНЫМИ УГЛАМИ $\theta > 70^\circ$, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ЯКУТСКОЙ КОМПЛЕКСНОЙ УСТАНОВКИ

*С. П. Кнуренко, И. С. Петров**

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю. Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия

Представлены описание методики и результаты поиска ливней, генерированных от нейтральных частиц, таких как гамма-кванты высоких энергий и астронейтрино. С этой целью проведен комплексный анализ данных: электронов, мюонов и черенковского света ШАЛ и их временных откликов в сцинтилляционных и черенковских детекторах. Получен верхний предел потока гамма-квантов при энергиях $3 \cdot 10^{18}$, 10^{19} и $3 \cdot 10^{19}$ эВ. Многопараметрический анализ характеристик ливней не обнаружил ШАЛ, образованных нейтрино.

A description of the technique and results of searching for showers generated from neutral particles, such as high-energy gamma rays and astroneutrino, is presented. To this end, a comprehensive analysis of the data of electrons, muons and Cherenkov light of EAS and their time responses in scintillation and Cherenkov detectors was carried out. The upper limit of the flux of gamma rays at energies $3 \cdot 10^{18}$, 10^{19} and $3 \cdot 10^{19}$ eV is obtained. Multiparametric analysis of the characteristics of showers did not detect the EAS generated by the neutrino.

PACS: 96.50.S-; 96.50.sd; 98.70.Rz; 98.70.Sa

ВВЕДЕНИЕ

Якутская комплексная установка ШАЛ (далее — Якутская установка) расположена в долине р. Лены, в 55 км к югу от г. Якутска. Установка предназначена для регистрации ШАЛ с энергией 10^{15} – 10^{20} эВ. В состав Якутской

*E-mail: igor.petrov@ikfia.ysn.ru

установки входят установки с оборудованием, предназначенным для выполнения как общих, так и отдельных задач, таких как измерение мюонов большим мюонным детектором, измерение профиля каскадной кривой системой черенковских детекторов типа камер Обскура, измерение радиоизлучения, мониторинг атмосферы в периоды регистрации ШАЛ и т. д.

Согласно моделям [1–3] предполагается присутствие в космологическом пространстве, наряду с другими частицами (ядрами различных химических элементов), первичных фотонов высоких и сверхвысоких энергий и астрофизических нейтрино.

В силу нейтральности фотоны не отклоняются от своего первоначального направления. По этой причине фотонная компонента может быть использована для определения физических характеристик источников космических лучей и изучения взаимодействия первичных фотонов сверхвысокой энергии с фотонным полем Вселенной и, как следствие, для объяснения формы спектра космических лучей в области энергий 10^{19} – 10^{20} эВ [4, 6]. Ливни от нейтральных частиц ввиду их физических свойств могут пройти достаточно большой путь в веществе и иметь максимум своего развития вблизи уровня моря, т. е. это «молодые» ливни. Основу такого ливня составляет электронно-фотонная компонента, которая рассеивается на большие углы и имеет большие задержки относительно частиц, формирующихся в стволе ливня. В таких событиях ШАЛ нужно ожидать на развертке сигнала от сцинтилляционного детектора большое количество пиков от электронов, позитронов и фотонов [7, 8].

Цель нашей работы — поиск кандидатов ШАЛ, образованных первичными фотонами сверхвысокой энергии и внеатмосферным нейтрино. Для этого использован комплексный подход, когда одновременно анализируются все компоненты ливня: электроны, мюоны и черенковское излучение, включая и пространственно-временные развертки импульсов от сцинтилляционных детекторов Якутской установки ШАЛ.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

1.1. Продольное развитие ШАЛ: глубина максимума ливня X_{\max} . Продольное развитие ливня на Якутской установке восстанавливается с помощью регистрации черенковского света ШАЛ [9] с применением математического аппарата, используемого при решении обратных задач [10, 11]. На рис. 1 показана зависимость глубины максимума развития ШАЛ X_{\max} от классификационного параметра $Q(200)$ — плотность потока черенковского света ШАЛ на расстоянии 200 м от оси ливня. Данные получены за период 1973–2014 гг.

С использованием базы черенковских данных получено распределение X_{\max} от первичной энергии ливня (см. рис. 1). Из этого рисунка видно, что

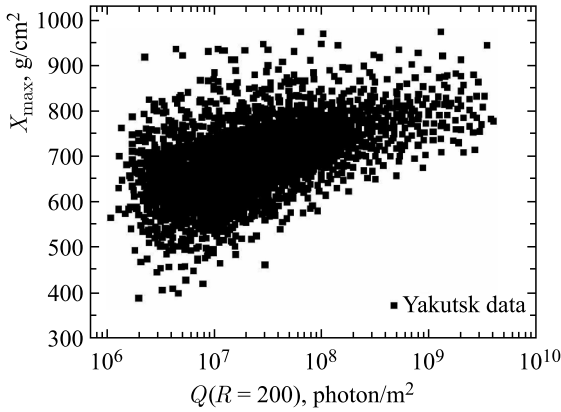


Рис. 1. Зависимость X_{\max} от классификационного параметра $Q(200)$

в распределении имеются случаи ШАЛ с $X_{\max} \geq 800$ г/см², т. е. с низким максимумом развития ливня по отношению к событиям, образованным ядром железа и даже протоном. Эти ливни и составили основу для проведенного анализа.

Усредненные данные Якутской установки вместе с данными других установок показаны на рис. 2. Там же даны расчеты по некоторым моделям адронных взаимодействий для первичных ядер и гамма-кванта высокой энергии. Как видно из рис. 2, ливень от γ -кванта имеет X_{\max} на 150–180 г/см² ниже в атмосфере, чем от протона с энергией 10^{19} эВ. Глубина максимума

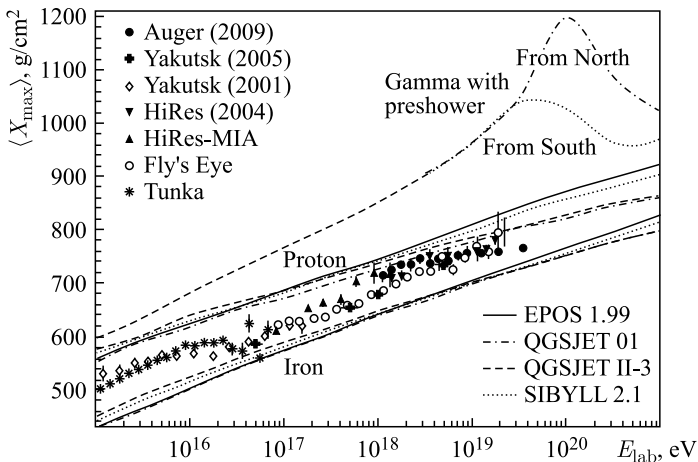


Рис. 2. Зависимость X_{\max} от энергии

развития ливня X_{\max} от γ -кванта находится вблизи уровня моря на глубине $\sim 950 \text{ г/см}^2$. В этом случае имеет место узкий каскад, преимущественно состоящий из электронов и фотонов, с очень малым содержанием мюонов. Этот каскад, образованный γ -квантом, отличается от ливня, образованного протоном или ядром какого-нибудь другого химического элемента. Поэтому глубина максимума развития ШАЛ X_{\max} может использоваться как первый критерий для поиска ШАЛ, образованного γ -квантом.

1.2. Содержание мюонов в ШАЛ. Как уже говорилось выше, в ливне от γ -кванта рождается незначительное количество мюонов. Если на установке измеряются мюоны, то по их содержанию в ливне можно судить о природе первичной частицы. К такому выводу приходим, если обратиться к расчетам мюонной компоненты по моделям адронных взаимодействий, показанным на рис. 3 и 4 [13]. На рис. 3 ожидаемые границы $\pm 1\sigma$ для протона, железа и γ -квантов обозначены разными кривыми.

На Якутской установке долю мюонов в ливне оценивают по отношению плотности потока мюонов на расстояниях 600 и 1000 м к общей заряженной компоненте $\rho_{\mu}/\rho_{\mu+e}$, так как эти параметры измеряются с большей точностью, чем полное число мюонов N_{μ} и заряженных частиц $N_{\mu+e}$ в ливнях с энергией $E_0 \geq 10^{18}$ эВ. Это и будет вторым критерием отбора ШАЛ для поиска ливней, образованных нейтральными частицами, к которым относятся γ -квант и нейтрино.

Из рис. 3 видно, что если учитывать флуктуации измеренных мюонов, можно заметить область перекрытия рассчитанных данных для γ -кванта (сплошная линия) с экспериментальными данными. Аналогичное перекрытие имеется и на рис. 4, где представлены флуктуации потока мюонов на расстоянии 1000 м от оси ливня, нормированные на энергию ливня (точки),

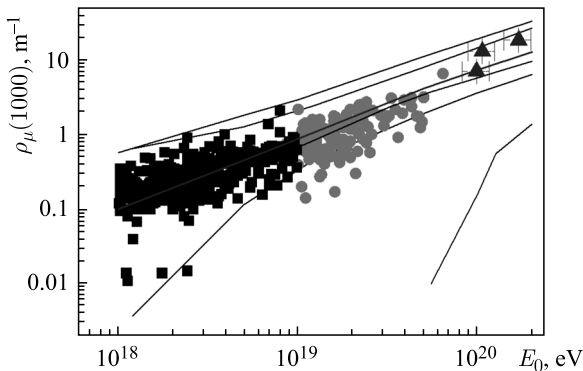


Рис. 3. Зависимость $\rho_{\mu}(1000)$ от энергии для событий с энергией $10^{18}-10^{19}$ эВ (квадраты), $\sim 10^{20}$ эВ (треугольники), $10^{19}-10^{20}$ эВ (кружки)

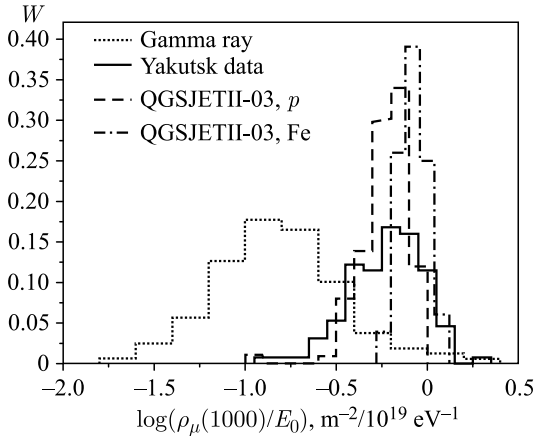


Рис. 4. Флуктуация потока мюонов $\rho_\mu(1000)/10^{19}$ эВ в ливнях с $E_0 > 10^{19}$ эВ

и сравнение с результатами расчетов (QGSjetII-03 + UrQMD) для протона, железа и фотона. Это позволяет предположить, что существуют в потоке первичные космические частицы и γ -кванты сверхвысоких энергий, которые образуют ШАЛ при прохождении через атмосферу Земли.

На рис. 5 приведены расчеты относительного содержания мюонов в ШАЛ с использованием плотности потока мюонов на расстоянии 600 м от оси. Расчеты выполнены для первичного γ -кванта, протона и ядра железа. Среднее распределение каждой из компонент космического излучения локализуется в определенной области и может быть выделено в эксперименте при достаточно точном измерении мюонов. Как видно из расчета, в ШАЛ от γ -кванта содер-

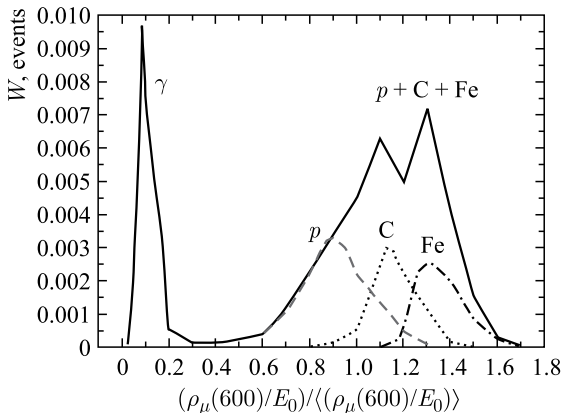


Рис. 5. Распределение ливней с энергией выше 10^{18} эВ и зенитными углами $0-70^\circ$

жание мюонов значительно меньше, чем в ливне от протона, и при точности измерения $\rho_\mu(600)$ порядка 5–10% выделить ШАЛ, образованный γ -квантом, не составит особого труда.

1.3. Зависимость доли мюонов от X_{\max} . Известно, что число мюонов зависит от высоты максимума развития ливня в атмосфере. Поэтому доля мюонов очень чувствительна к этому параметру каскадной кривой. Это следует из расчетов по модели QGSjetII-04. Причем доля мюонов от протона и ядра железа, как видно из рис. 6, локализуется в разных местах, что позволяет разделить ливни на протонные и ливни от ядра железа по этому параметру, что было использовано в данной работе с целью поиска нейтральных частиц в космических лучах.

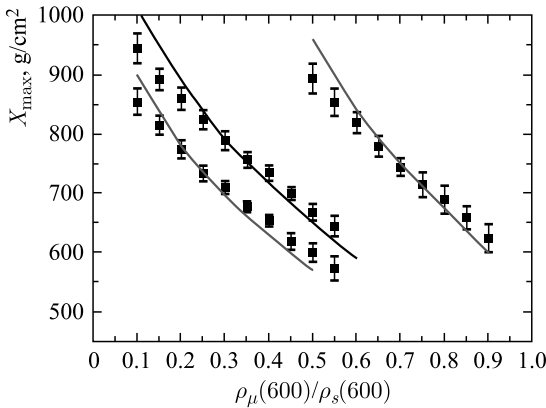


Рис. 6. Зависимость доли мюонов от глубины максимума X_{\max} в электронно-фотонном каскаде

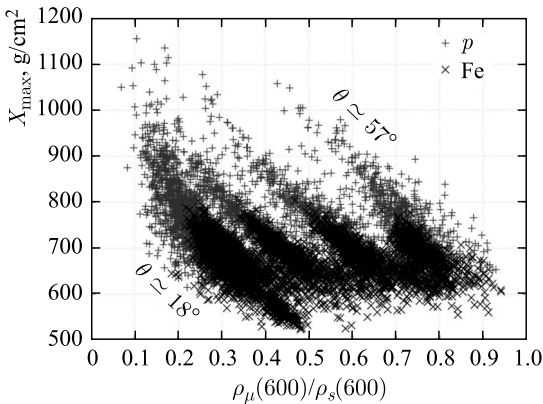


Рис. 7. Зависимость относительной доли мюонов с $\varepsilon_{\text{thr}} \geq 1$ ГэВ от глубины максимума X_{\max}

Для этого мы воспользовались экспериментальной зависимостью X_{\max} от $\rho_{\mu}(600)/\rho_s(600)$, показанной на рис. 6. Там же приведены расчеты по модели QGSjetII-04 для разных зенитных углов, которые получены из усреднений искусственных ливней, показанных на рис. 7, в случае первичных протона p и ядра железа Fe.

1.4. Временные развертки сигнала в сцинтилляционных детекторах наземного и подземного размещения. Ливни, образованные разными первичными частицами, имеют максимум развития на разных глубинах в атмосфере. По этой причине часть вторичных частиц (в основном электронов) при по-

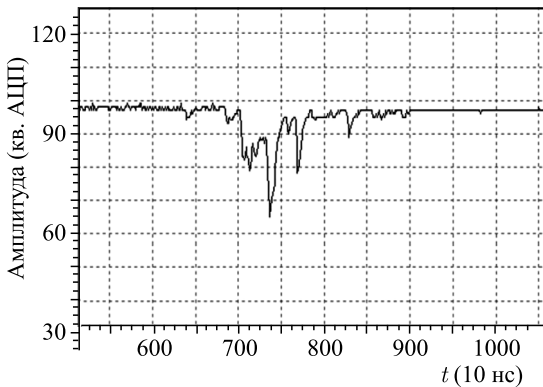


Рис. 8. Импульс вертикального ливня при $E_0 = 1,7 \cdot 10^{19}$ эВ, $\theta = 18^\circ$, $R = 1298$ м. Детектор площадью $s = 2$ м² и с порогом $\varepsilon_{\text{thr}} \geq 10$ МэВ

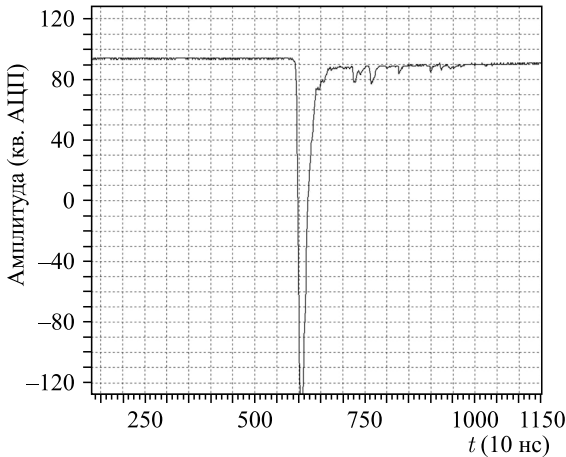


Рис. 9. Импульс наклонного ливня при $E_0 = 2,4 \cdot 10^{19}$ эВ, $\theta = 56^\circ$, $\psi = 200^\circ$, $R = 1000$ м

тере энергии на ионизацию воздуха выбывают из каскадного процесса. Тогда на уровень моря будет приходиться определенный тип частиц, таких как электроны, фотоны, мюоны в случае вертикального ливня (рис. 8), только мюоны в сильнонаклонных ливнях (рис. 9), что и фиксируется на временной развертке отклика в сцинтиляционном детекторе. Для первичного γ -кванта или нейтрино максимум каскадной кривой будет вблизи уровня наблюдения, и мы вправе ожидать отклик, присущий электронно-фотонной компоненте ШАЛ. Это еще один из критериев, по которому можно отбирать ливни, образованные нейтральными частицами.

На рис. 8 видно, что в сильнонаклонных ливнях структура импульса отличается от вертикальных ливней, а также прослеживается одиночный и узкий по ширине импульс. Компактность прихода таких частиц свидетельствует о том, что эти частицы рождаются в первых актах взаимодействия первичной частицы с ядрами атомов воздуха в ходе процессов распада π^\pm -мезонов и, следовательно, являются мюонами.

2. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

2.1. Оценка верхнего предела потока γ -квантов. С целью поиска γ -квантов сверхвысоких энергий проанализированы ливни за период с 2000 по 2014 г. Рассмотрены четыре интервала энергии, в каждом из которых был осуществлен поиск событий ШАЛ, удовлетворяющих вышеописанным критериям. Отобранные таким способом ливни составили основу для дальнейшего анализа. В качестве примера в таблице приведены характеристики некоторых из отобранных ливней.

Для анализа взят период 2000–2014 гг. и рассмотрена область энергий $1 \cdot 10^{18} - 5 \cdot 10^{19}$ эВ. Весь диапазон энергий был разбит на интервалы энергии, равные $1 \cdot 10^{18} - 3 \cdot 10^{18}$ эВ, $3 \cdot 10^{18} - 6 \cdot 10^{18}$ эВ, $6 \cdot 10^{18} - 9 \cdot 10^{18}$ эВ, $9 \cdot 10^{18} - 50 \cdot 10^{18}$ эВ. Для эффективности выборки ливни отбирались в центре

События ШАЛ, возможно, образованные первичными γ -квантами

Дата	Время	$\log E_0$	θ	$\rho_\mu / \rho_{\mu+e}$	X_{\max}	n
05.03.2002	23:34:18	19,70	44,2	$0,24 \pm 0,06$ (0,17)	837	3
07.12.2005	01:11:45	19,28	32,4	$0,18 \pm 0,05$ (0,15)	871	4
24.01.2006	19:03:59	19,41	10,9	$0,08 \pm 0,03$ (0,08)	947	7
11.05.2007	06:23:31	19,35	9,9	$0,09 \pm 0,04$ (0,09)	909	6
08.05.2008	20:36:02	19,18	19,8	$0,15 \pm 0,04$ (0,14)	897	5
13.03.2010	16:36:00	19,60	23,9	$0,11 \pm 0,03$ (0,10)	915	7
24.01.2006	19:03:59	19,41	10,9	$0,08 \pm 0,06$ (0,08)	864	6

установки на площади $s = 3 \text{ км}^2$ до энергии $6 \cdot 10^{18} \text{ эВ}$, а выше этой энергии на площади $s = 12 \text{ км}^2$. В этом случае вероятность регистрации ливней была выше $W \geq 0,9$ и точность определяемых параметров ШАЛ была не менее 15%. При поиске ливней кандидатов ШАЛ от первичного γ -кванта брались в расчет вышеописанные критерии по таким характеристикам, как X_{max} , ρ_{μ}/ρ_s , и по числу пиков в отклике сцинтилляционных детекторов наземного и подземного размещения. Далее по формуле (1) вычислено

$$F_{\gamma}^{95\text{CL}} = \frac{N_{\gamma}^{95\text{CL}}(E_{\gamma} > E_0)}{\varepsilon_{\gamma, \text{min}}}, \quad (1)$$

где E_{γ} — энергия фотона; $N_{\gamma}^{95\text{CL}}$ — число ливней с энергией выше E_0 на 95%-м уровне достоверности — кандидатов, образованных первичным γ -квантом; $\varepsilon_{\gamma, \text{min}}$ — экспозиция работы черенковских и сцинтилляционных детекторов Якутской установки ШАЛ.

Верхний предел потока первичных γ -квантов для каждого из интервалов:

- 1) $\langle E_0 \rangle = 1 \cdot 10^{18} \text{ эВ}$, $F^{95\text{CL}} = 8,3 \cdot 10^{-2}$;
- 2) $\langle E_0 \rangle = 3 \cdot 10^{18} \text{ эВ}$, $F^{95\text{CL}} = 4,9 \cdot 10^{-2}$;
- 3) $\langle E_0 \rangle = 6 \cdot 10^{18} \text{ эВ}$, $F^{95\text{CL}} = 1,2 \cdot 10^{-2}$;
- 4) $\langle E_0 \rangle = 9 \cdot 10^{18} \text{ эВ}$, $F^{95\text{CL}} = 6,9 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}$.

Таким образом, по данным Якутской установки получен верхний предел интегрального потока фотонов I_{γ} выше 1 ЭэВ, вплоть до 10 ЭэВ. Данные результаты вместе с данными установок Auger [16, 17], Telescope Array [8] и

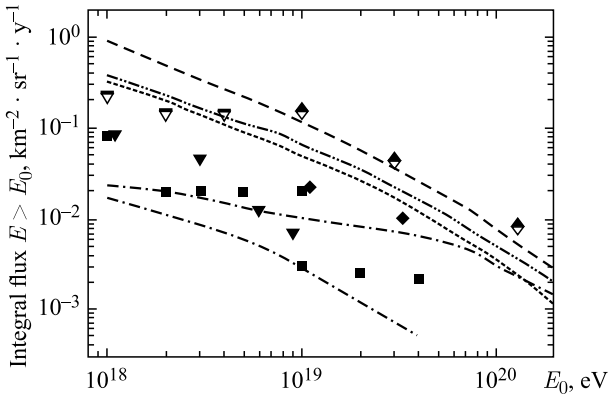


Рис. 10. Верхний предел интегрального потока первичных фотонов космических лучей по данным Якутской установки (треугольники). Сравнение с данными экспериментов обсерватории Оже [16, 17] (квадраты), АГАСА [19], Telescope Array [8] (ромбы). Кривые (сверху) — предсказания для источников: супертяжелой материи [4] (две верхние), топологических дефектов [4] и частиц, слабо взаимодействующих с веществом [4]

более ранними данными Якутской установки [18] показаны на рис. 10. При сравнении пределов потока γ -квантов со спектрами, полученными на Якутской установке, при соответствующих энергиях получена верхняя граница доли фотонов, равная 0,4 % при энергии 1 ЭэВ и 8,0 % при 10 ЭэВ.

На эти оценки могут повлиять следующие неточности измерений:

1) ошибки в оценке X_{\max} (на Якутской установке точность определения X_{\max} равна ± 25 г/см²);

2) ошибки лоцирования оси ливня, особенно вблизи границы установки, по $X_0 = 25$ м, $Y_0 = 25$ м;

3) неопределенность в оценке энергии ливня методом баланса энергий ~ 25 %.

Полученные в работе результаты можно рассматривать как указание на возможное существование в потоке космических лучей γ -квантов сверхвысоких энергий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью многолетних, непрерывных наблюдений ШАЛ на Якутской установке стало возможным не только изучение процессов взаимодействия и развития каскадирования различных частиц в атмосфере, но и поиск таких нейтральных частиц, как фотоны сверхвысоких энергий и астрофизических нейтрино.

Многокомпонентный анализ ШАЛ с использованием вышеописанных критериев не обнаружил явных ливней, образованных γ -квантами или нейтрино. В то же время выполненные по модели QGSJETII [14] расчеты для первичного протона, ядра железа и γ -кванта (см. рис. 1 и 4) говорят, что если учитывать флуктуации измерений мюонов в пределах 1σ , то вероятность регистрации ШАЛ от нейтральных частиц существует. Кандидатами таких ливней можно считать «безмюонные» ливни, обнаруженные на Якутской установке ШАЛ [15], и ливни, выделенные в данной работе (таблица).

Представленные результаты (см. рис. 10) по верхнему пределу потока γ -квантов могут быть использованы для проверок различных астрофизических моделей (включая поиск темной материи) и установления природы образования таких частиц, как астронейтрино в космологическом пространстве.

В целях изучения природы нейтральных частиц в области сверхвысоких энергий требуется совершенствование методики регистрации, прежде всего сильнонаклонных ливней. Возможно даже создание специализированных установок, например мюонных телескопов с большой приемной площадью для регистрации доли мюонов с точностью 3–5 % в индивидуальных событиях ШАЛ.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-29-13019-офи_м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Becker J. K.* // Phys. Rep. 2008. V. 458. P. 173.
2. *Ahlers M., Achordoqui L. A., Gonzalez-Garcia M. C., Halze F., Sarkar S.* // Astropart. Phys. 2010. V. 34. P. 106.
3. *Kotera K., Allard D., Olinto A.* // JCAP. 2010. V. 10. P. 013.
4. *Gelmini G., Kalashev O., Semikoz D.* // J. Theor. Phys. 2008. V. 106. P. 1061.
5. *Zatsepin G. T., Kuzmin V. A.* // JETP Lett. 1966. V. 4. P. 78.
6. *Ave M., Hilton J. A., Vazquez R. A., Watson A. A., Zas E.* // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 85.
7. *Knurenko S., Petrov Z., Yegorov Yu.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2013. V. 409. P. 012090.
8. *Rubtsov G. I., Fukushima M., Ivanov D., Stokes B. I., Thomson G. B., Troitsky S. V. for the TA Collab.* // EPJ Web of Conf. 2013. V. 53. P. 05001.
9. *Knurenko S. P., Kolosov V. A., Petrov Z. E., Pudov A. G., Sidorov R. G., Sleptsov I. E.* // Science and Education. 1998. No. 4. P. 46–50.
10. *Peters B.* // Nuovo Cim. 1961. V. XXII. P. 800–819.
11. *Dyakonov M. N., Knurenko S. P., Kolosov V. A., Krasilnikov D. D., Lischenyuk F. F., Sleptsov I. E., Nikolsky S. I.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1986. V. 248. P. 224–226.
12. *Knurenko S. P., Kolosov V. A., Petrov Z. E.* // Proc. of the 27th ICRC, Hamburg, 2001. V. 1. P. 157–160.
13. *Artamonov V. P., Afanasyev B. N., Glushkov A. V.* // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 1994. V. 58. P. 92.
14. *Knurenko S. P., Egorova V. P., Ivanov A. A., Kolosov V. A., Makarov I. T., Petrov Z. E., Sleptsov I. Ye., Struchkov G. G.* // Nucl. Phys. B. 2006. V. 151. P. 92–95.
15. *Knurenko S. P., Ivanov A. A., Pravdin M. I., Sabourov A. V., Sleptsov I. Ye.* // Nucl. Phys. B. 2008. V. 175–176. P. 201–206.
16. *Settimo M. for the Pierre Auger Collab.* // Proc. of the 32nd ICRC. Beijing, 2011. P. 393.
17. *Scherini V. for the Pierre Auger Collab.* // EPJ Web Conf. 2013. V. 53. P. 05002.
18. *Glushkov A. V., Makarov I. T., Pravdin M. I., Sleptsov I. E.* // Phys. Rev. D. 2010. V. 82. P. 041101.
19. *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., Mahrour A. M., Mase K.* // Astrophys. J. 2002. V. 571. P. L117.
20. *Ellis J., Mayes V. E., Nanopoulos D. V.* // Phys. Rev. D. 2006. V. 74. P. 115003.