

ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Новые оценки энергии широких атмосферных ливней по сигналам на больших расстояниях от оси ливняЛ. Г. Деденко^{1,2,a}, Т. М. Роганова^{2,b}, Г. Ф. Федорова^{2,c}¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра общей физики.²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ). Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.E-mail: ^addn@dec1.sinp.msu.ru, ^brogatm@yandex.ru, ^cfdr@dec1.sinp.msu.ru

Статья поступила 29.06.2016, подписана в печать 15.07.2016.

На основании детальных таблиц сигналов в сцинтилляционных детекторах Якутской комплексной установки ШАЛ, вычисленных с помощью пакета GEANT4, получена численная оценка энергии E_0 наклонных широких атмосферных ливней по экспериментальному сигналу на расстоянии 1000 м от оси ливня и известному зенитному углу θ с использованием пакета CORSIKA. Эта оригинальная оценка получена без использования метода сечения спектров сигналов линиями равной интенсивности. Получены также значения практических единиц измерения сигналов в наземных и подземных детекторах.

Ключевые слова: широкие атмосферные ливни, энергия ливня, сцинтилляционные детекторы, сигнал в детекторе.

УДК: 524.1. PACS: 96.50.sd.

Введение

Для решения многих фундаментальных проблем физики космических лучей в области сверхвысоких энергий необходимы измерения направления прихода, природы и энергии частиц первичного космического излучения (ПКИ). Целью являются исследования взаимодействий частиц ПКИ с ядрами атомов в атмосфере, поиски возможных проявлений новой физики в области энергий, значительно превышающих достигнутые на Большом адронном коллайдере (БАК), выяснение природы механизмов ускорения в источниках и поиски таких источников. Метод исследования в области сверхвысоких энергий — это наблюдение широких атмосферных ливней (ШАЛ) на уникальных установках и регистрация сигналов в различных детекторах от вторичных частиц ШАЛ. Поскольку интенсивность потока частиц ПКИ в области сверхвысоких энергий очень мала (примерно одна частица с энергией 10^{20} эВ падает на площадь 1 км^2 один раз в 100 лет), для их регистрации необходимо размещать детекторы на большой площади. По экономическим соображениям число детекторов не может быть очень велико. Поэтому на самой большой в мире установке РАО [1], расположенной в Аргентине, расстояния между детекторами равны 1.5 км, а на установке ТА [2] — 1.2 км. На Якутской установке (ЯКУШАЛ) [3], которая во много раз меньше, эти расстояния изменяются от сотен метров до километра. Следует отметить, что имеются в виду детекторы, в которых регистрируются вторичные частицы ШАЛ. Именно такие детекторы могут эксплуатироваться практически

со 100%-й эффективностью. Телескопы, в которых измеряется поток флуоресцентного света, испускаемого возбужденными частицами ШАЛ атомами азота в атмосфере, а также детекторы излучения Вавилова–Черенкова, могут эксплуатироваться только в ясные безлунные ночи. Поэтому их эффективность составляет величину порядка $\sim 5\%$ и основная доля ливней ($\sim 95\%$) регистрируется наземными сцинтилляционными детекторами. Для корректной интерпретации сигналов в этих детекторах проводятся расчеты их значений в рамках различных моделей взаимодействия адронов. На установке ЯКУШАЛ в основном используются сигналы, зарегистрированные на расстояниях 600 м от оси ШАЛ.

В настоящей статье предлагается для установки [3] брать данные, полученные на расстоянии 1000 м. Это позволит более адекватно сопоставлять результаты измерений на самой большой установке РАО и ЯКУШАЛ. Однако следует отметить, что флуктуации сигнала на расстоянии 1000 м выше, чем на меньших расстояниях, и их надо учитывать, как было предложено в [4]. Отметим также, что в статье предлагается оригинальная оценка энергии, которая не использует метод сечения спектра сигналов линиями равной интенсивности [5].

1. Метод расчета

С помощью пакета GEANT4 [6] сначала были рассчитаны детальные таблицы сигналов в наземных и подземных сцинтилляционных детекторах ЯКУШАЛ для летних и зимних, когда детекторы покрыты снегом, условий эксплуатации.

Сигналы от гамма-квантов, позитронов и электронов вычислялись в интервале кинетических энергий (полных энергий в случае гамма-квантов) $0.1\text{--}10^5$ МэВ и интервале кинетических энергий мюонов $10^2\text{--}10^7$ МэВ. Каждый порядок по энергии делился на 20 бинов. Все эти частицы падали на детектор под разными углами в интервале значений косинуса угла падения от 0.1 до 1 с шагом 0.05. Всего было проведено $\sim 10^8$ вариантов расчета со статистикой 10^4 для каждого варианта. Практическая единица измерения сигналов — вертикальный эквивалентный мюон (ВЭМ) — энергия, которая регистрируется в детекторе от прохождения вертикального мюона, — определялась моделированием этого прохождения с помощью пакета GEANT4. Сигналы $s(r, \theta)$ в наземных сцинтилляционных детекторах от различных частиц ШАЛ рассчитывались в рамках моделей QGSJETII-04 [7], EPOS LHC [8] и GHEISHA [9] для расстояния 1000 м от оси ливня и зенитных углов 0, 15, 30 и 45° с помощью пакета CORSIKA [10]. В вариантах QGSJETII-04 и EPOS LHC моделей взаимодействия адронов учтены первые результаты экспериментов на БАКе [11, 12]. Поэтому несомненный интерес представляют расчеты параметров ШАЛ, выполненные именно в рамках этих моделей. Дополнительное обоснование выбора разных моделей последует как из новых экспериментов на БАКе, так и из сравнения данных экспериментов по ШАЛ с результатами расчетов [13–15], выполненных в рамках этих моделей. Эти сигналы для каждого ШАЛ вычислялись по формуле

$$s(r, \theta) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{m_i} s_{ij}(E, \theta). \quad (1)$$

В этой формуле $s_{ij}(E, \theta)$ — табличный сигнал от частицы с номером j типа i и энергией E , которая падает на детектор под углом θ . Суммируются сигналы от всех частиц от $j = 1$ до $j = m_i$ одного типа с различными энергиями E и углами θ и от всех типов i частиц (гамма-квантов, позитронов, электронов и мюонов). Наконец, использовалась теорема Байеса [4] для оценки распределения $\phi(E_0|s)$ энергии E_0 при фиксированном сигнале s по распределениям $\Psi(s|E_0)$ этого сигнала при фиксированных значениях энергии E_0 ливней.

2. Результаты и обсуждение

Впервые сигналы в сцинтилляционных детекторах были рассчитаны в работах [16] для установки AGASA и [17–19] для Якутской установки. Моделирование процесса прохождения вертикального мюона через детектор привело к следующим значениям единиц измерения сигнала ВЭМ: для наземных детекторов 1 ВЭМ = 10.8 МэВ, а для подземных 1 ВЭМ = 11.4 МэВ (результаты первого моделирования [17–19] на ~ 0.4 МэВ меньше этих значений). Важно отметить, что практическая единица

измерения сигнала ВЭМ — это не потери энергии мюона в детекторе, а регистрируемая в нем энергия. Очевидно, часть потерь энергии мюона выходит из детектора по причине малой толщи сцинтиллятора (5 см) и не регистрируется. Особенно это важно при больших энергиях мюона, когда доминируют радиационные процессы.

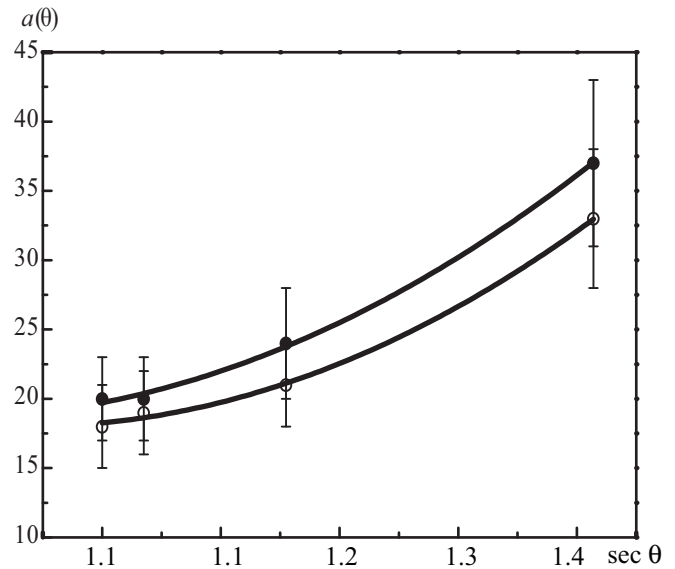
Проведенное моделирование калибровки практической единицы измерения сигнала ВЭМ позволяет сравнивать экспериментальные и расчетные сигналы. Нам представляется, что их целесообразно сравнивать для тех зенитных углов θ , под которыми наблюдались ливни. Таким образом, нами предлагается следующая оценка энергии E_0 ШАЛ:

$$E_0 = a(\theta) \cdot s(1000, \theta) \cdot 10^{17}. \quad (2)$$

В этой формуле $s(1000, \theta)$ — экспериментальный сигнал на расстоянии 1000 м от оси ливня, упавшего на установку под зенитным углом θ , а расчетный коэффициент $a(\theta)$ для рассматриваемой модели определяется из вычислений

$$a(\theta) = a_0 + a_1 \sec \theta + a_2 \sec^2 \theta. \quad (3)$$

Коэффициенты a_0 , a_1 и a_2 в формуле (3) вычислялись из известных значений коэффициента $a(\theta)$ для углов 0, 15, 30 и 45°. Аппроксимации коэффициента $a(\theta)$ зависимости (3) для моделей QGSJETII-04 и EPOS LHC приведены на рисунке. Видно, что аппроксимирующие кривые практически проходят через расчетные точки. Это может вызывать вопросы, поскольку погрешности не малы. Однако следует обратить внимание, что две левые точки из четырех расчетных очень близки друг к другу (значения абсцисс равны 1 и ~ 1.03 соответственно) и поэтому эффективно эквивалентны одной. Через три точки всегда можно провести



Коэффициенты $a(\theta)$ и их аппроксимация в зависимости от $\sec(\theta)$ для моделей QGSJETII-04 (черные кружки) и EPOS LHC (светлые кружки). Сплошными линиями обозначены аппроксимации этих зависимостей

параболу. Это и объясняет наблюдаемое расположение аппроксимирующих кривых и расчетных точек.

Коэффициент корреляции точек и (3) равен ~ 0.99 , что свидетельствует о хорошем качестве этой аппроксимации. Значения коэффициентов в формуле (3) приведены для моделей QGSJETII-04 и EPOS LHC в таблице.

Значения коэффициентов аппроксимации a_0 , a_1 и a_2

Модель	a_0	a_1	a_2
QGSJETII-04	75.836	– 123.401	65.826
EPOS LHC	63.900	– 105.023	60.849

Таким образом, формула (2) по экспериментальному сигналу $s(1000, \theta)$ в сцинтилляционном детекторе и вычисленному по формуле (3) коэффициенту $a(\theta)$ позволяет оценить энергию E_0 ШАЛ, не прибегая к методу сечения спектров линиями равной интенсивности [3]. Сигналы в сцинтилляционных детекторах Якутской установки [20] использовались и для определения состава космических лучей в области энергий 10^{17} – 10^{19} эВ. Отметим, что сцинтилляционные детекторы будут использоваться на установке Тунка-133 [21] и исследуются возможности изучения состава и других параметров первичного космического излучения [22, 23].

Ошибка определения энергии E_0 при использовании метода [5] может быть очень велика. Например, в [3] используется пробег поглощения сигнала $\lambda \sim 450$ г/см², а наши расчеты для моделей QGSJETII-04 и EPOS LHC дают оценку пробега ~ 700 г/см². После приведения значения сигнала к величине для вертикального направления для наклонных ливней с углом $\theta = 60^\circ$ получается разница в оценке энергии в $\sim e^{1020(1/450 - 1/700)} \approx 2.25$ раза. Возможно, что превышение интенсивности частиц ПКИ по сравнению с данными [1, 2], наблюдаемое на ЯКУШАЛ, частично связано с методом сечения спектра сигналов линиями равной интенсивности. К сожалению, в последних работах якутской группы [24, 25] не отказались от этого метода. Применение теоремы Байеса понижает оценку энергии E_0 примерно в 2 раза из-за больших флуктуаций ($\sim 100\%$).

Заключение

Для наземных и подземных детекторов ЯКУШАЛ рассчитаны детальные таблицы сигналов от гамма-квантов, позитронов и электронов в интервалах энергий 0.1– 10^5 МэВ и 10^2 – 10^5 МэВ от мюонов и в интервале значений косинуса зенитного угла 0.1–1 с шагом 0.05. Получены значения практической единицы измерения сигналов ВЭМ 10.8 МэВ для наземных и 11.4 МэВ для подземных детекторов. Предложены оригинальные формулы (2) и (3) для оценки энергии E_0 ШАЛ для моделей QGSJETII-04 и EPOS LHC. Предложено

использовать теорему Байеса для коррекции оценки энергии из-за флуктуаций.

Авторы выражают благодарность Н. В. Анютину за помощь в проведении численных расчетов.

Список литературы

1. *The PAO Collab.* // Phys. Rev. Lett. 2008. **101**. P. 061101.
2. *Abu-Zayyad T., Aida R., Allen M. et al. (TA Collab.)* // Astrophys. J. Lett. 2013. **768**. P. L1.
3. *Glushkov A.V., Ivanov A.A., Knurenko S.P. et al.* // Proc. 28th ICRC. Tsukuba. 2003. **1**. P. 393.
4. *Dedenko L.G., Zatsepin G.T.* // Proc. 6th ICRC. Moscow, 1960. **2**. P. 201.
5. *La Pointe M., Kamata K., Gaebler J. et al.* // Canad. J. Phys. 1968. **46**. P. S68.
6. *The GEANT4 Collab.* // <http://geant4.web.cern.ch/support/index.shtml>
7. *Ostapchenko S.S.* // Phys. Rev. D. 2011. **83**. P. 014018.
8. *Pierog T., Karpenko Iu., Katzy J.M. et al.* // Phys. Rev. C. 2015. **92**. P. 034906.
9. *Fesefeldt H.C.* // Report PITHA 85-02. 1985. RWTH Aachen.
10. *Heck D., Schatz G., Thouw T. et al.* // Report FZKA 6019. 1998. Forschungszentrum Karlsruhe.
11. *Menjo H., Adriani O., Bongi M. et al.* // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A. 2012. **692**. P. 224.
12. *Eggert K. on behalf of the TOTEM Collab.* // EPJ Web of Conferences. 2013. **52**. P. 01006.
13. *Ito Y.* // EPJ Web of Conferences. 2015. **99**. P. 01001.
14. *Pierog T.* // EPJ Web of Conferences. 2015. **99**. P. 09002.
15. *d'Enterria D., Engel R., Pierog T. et al.* // Astropart. Phys. 2011. **35**. P. 98.
16. *Chikawa M., M. Fukushima M., Hayashida N. et al. (AGASA Collab.)* // Proc. of the 27th ICRC. Hamburg, 2001. **1**. P. 329.
17. *Dedenko L.G., Fedorova G.F., Roganova T.M.* // J. Phys. Conference Series. 2013. **409**. P. 2093.
18. *Деденко Л.Г., Роганова Т.М., Федорова Г.Ф.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. **77**, № 11. С. 1561.
19. *Деденко Л.Г., Роганова Т.М., Федорова Г.Ф.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2011. № 4. С. 37. (*Dedenko L.G., Roganova T.M., Fedorova G.F.* // Moscow University Phys. Bull. 2011. **66**. N 4. P. 358.)
20. *Dedenko L.G., Fedorova G.F., Roganova T.M. et al.* // J. Phys. G: Nuclear and Particle Physics. 2012. **39**. № 9. P. 095202.
21. *Буднев Н.М., Иванова А.Л., Калмыков Н.Н. и др.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2014. № 4. С. 80. (*Budnev N.M., Ivanova A.L., Kalmykov N.N. et al.* // Moscow University Phys. Bull. 2014. **69**, N 4. P. 357.)
22. *Буднев Н.М., Иванова А.Л., Калмыков Н.Н. и др.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2015. № 2. С. 80. (*Budnev N.M., Ivanova A.L., Kalmykov N.N. et al.* // Moscow Univ. Phys. Bull. 2015. **70**. P. 160.)
23. *Yashin I.I., Astapov I.I., Barbashina N.S. et al.* // J. Phys. Conference Series. 2016. **675**. P. 032037.
24. *Глушков А.В., Правдин М.И., Сабуров А.В.* // Письма в ЖЭТФ. 2014. **99**. С. 501.
25. *Glushkov A.V., Pravdin M.I., Sabourov A.V.* // Phys. Rev. D. 2014. **90**. P. 012005.

New energy estimates of extensive air showers using signals detected at great distances from the shower axis**L. G. Dedenko^{1,2,a}, T. M. Roganova^{2,b}, G. F. Fedorova^{2,c}**¹ *Department of General Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*² *Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119191, Russia.*
E-mail: ^a ddn@dec1.sinp.msu.ru, ^b rogatm@yandex.ru, ^c fdr@dec1.sinp.msu.ru.

On the basis of detailed tables of signals from Yakutsk extensive air shower scintillation detectors that were calculated using the GEANT4 package, the numerical evaluation of the energy E_0 of inclined extensive air showers has been obtained using a pilot signal at a distance of 1000 m from the shower axis and the known zenith angle θ using the CORSIKA package. This original estimate was obtained without using the method of cutting the signal spectra according to lines of equal intensity. We also obtained the values of units of practical signals for surface and underground detectors.

Keywords: extensive air shower, energy of air shower, scintillation detector, signal in detector.

PACS: 96.50.sd.

Received 29 June 2016.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2017. **72**, No. 2. Pp. 187–190.

Сведения об авторах

1. Деденко Леонид Григорьевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-24-37, e-mail: ddn@dec1.sinp.msu.ru.

2. Роганова Татьяна Михайловна — доктор физ.-мат. наук, зав. лабораторией; тел.: (495) 939-24-37, e-mail: rogatm@yandex.ru.

3. Федорова Галина Федоровна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-24-37, e-mail: fdr@dec1.sinp.msu.ru.