Письма в ЖЭТФ, том 108, вып. 2, с. 130 – 134

Новый метод оценивания энергии широких атмосферных ливней по сигналам наземных детекторов Якутской установки

Л. Г. Деденко[+*1)], *А. В. Лукьяшин*[×∘], *Т. М. Роганова*[*], *Г. Ф. Федорова*[*]

[+]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра общей физики, 119991 Москва, Россия*

[*]*Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ), 119991 Москва, Россия*

[×]*Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова Национального исследовательского центра Курчатовский институт, 117218 Москва, Россия*

[∘]*Национальный исследовательский ядерный университет Московский инженерно-физический институт (МИФИ), 115409 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 6 марта 2018 г.

После переработки 13 апреля 2018 г.

Предложен новый метод оценивания энергии наклонных широких атмосферных ливней по сигналам в наземных сцинтилляционных детекторах Якутской установки, расположенных на расстоянии 600 м от оси ливня в плоскости установки, и результатам расчета этих сигналов в рамках двух моделей взаимодействия адронов. Получены новые оценки энергии для 116 ливней, зарегистрированных в разные годы, и показано, что энергетические спектры частиц первичного космического излучения, измеренные на Якутской установке, согласуются с мировыми данными.

DOI: 10.1134/S0370274X18140126

1. Введение. Исследования природы, энергии и направлений прихода частиц первичного космического излучения (ПКИ) в области сверхвысоких энергий проводятся методом наблюдений и регистрации параметров широких атмосферных ливней (ШАЛ). На Якутской комплексной установке (ЯКУ) регистрируется излучение Вавилова–Черенкова (ИВЧ) и с помощью наземных сцинтилляционных детекторов (НСД) и подземных детекторов изучается электронно-фотонная и мюонная компонента ливней.

НСД эксплуатируются в течение практически $\sim 100\,\%$ астрономического времени, а детекторы ИВЧ и флуоресцентного света лишь в течение 5–10 %. Поэтому оценки энергии E_0 по сигналам $s(r,\theta)$ в НСД, расположенных на различных расстояниях r от оси ливня, упавшего на установку под зенитным углом θ, очень важны. Оптимальная процедура оценки энергии E_0 по показаниям $s(r,\theta)$ всех сработавших детекторов требует больших вычислений [1, 2], поэтому обычно для этой цели используется сигнал $s(r,\theta)$ на каком-то фиксированном расстоянии r от оси ливня. В случае ЯКУ это 600 м. Величина сигнала $s(600,\theta)$ определяется из экспериментальной функции пространственного распределения (ФПР) сигналов $s(r,\theta)$.

Поскольку НСД расположены в плоскости установки, то при интерпретации сигналов от наклонных ливней с разными зенитными углами θ может возникнуть проблема. В случае таких ливней толщи покрытия и самого сцинтиллятора возрастают пропорционально $\sim \sec(\theta)$ и поэтому изменяется величина сигнала по сравнению с детектором, расположенным в плоскости, перпендикулярной оси ливня. Фактически это означает, что ливни с разными зенитными углами регистрируются разными детекторами. Никаких проблем не будет, если сигналы в этих разных детекторах сопоставлять с соответствующими расчетными, как это делается для вертикальных ливней. Проблема возникает только в случае сопоставления сигналов от ливней с разными зенитными углами, когда сигнал $s(600,\theta)$ в наклонном ливне пересчитывается в сигнал в детекторе, расположенном в плоскости, перпендикулярной оси ливня, а затем в сигнал $s(600,0^\circ)$ от вертикального ливня. Действительно, как показано в 3-м разделе, при первом пересчете, упомянутом выше, из-за выбранной на ЯКУ единицы измерения сигнала насильственно занижа-

1)e-mail: ddn@dec1.sinp.msu.ru

ется электронно-фотонная часть сигнала и, как следствие, искажается зенитно-угловая зависимость этой части. На ранних этапах работы ЯКУ пересчет сигнала от наклонного ливня к сигналу от вертикального ливня выполнялся с использованием пробега поглощения λ этого сигнала. Этот пробег в отличие от более поздних работ [3–6], в которых пересчеты электронно-фотонных и мюонных частей сигнала выполнялись раздельно, оценивался методом сечения спектров линиями равной интенсивности [7]. Этот метод, как показано в работах [8, 9], применим только в случае пренебрежения флуктуациями в развитии ливней, которые велики [10, 11]. Очевидно, что все эти преобразования вносят дополнительные погрешности в оценку энергии ливня E_0 по сигналу $s(600, 0°)$.

В настоящей работе предложен более простой метод вычисления новой оценки E_n энергии E_0 ШАЛ по сигналам $s_n(600, \theta)$ (нижний индекс n – *new*) в наклонных ливнях и впервые получено согласие энергетического спектра ЯКУ с мировыми данными.

2. Метод расчета оценки E_n энергии E_0 ливня. Сначала на основе показаний различных НСД вычислялась аппроксимация ФПР сигналов $s(r, \theta)$ в конкретном наклонном ливне по методу наименьших квадратов:

$$y = b_0 + b_1 x + b_2 x^2, \tag{1}$$

где $x = \lg(r/1\text{м})$, $y = \lg(s(r, \theta))$. Эта аппроксимация определяет сигнал $s(600, \theta)$. Отметим, что сигнал измеряется в единицах $E_1 \cdot \sec\theta$, принятых на ЯКУ, которые пропорциональны $\sim \sec(\theta)$ и различны для ливней с разными зенитными углами. В данной работе предлагается сигналы в НСД для всех наклонных ливней измерять в одних и тех же единицах E_{VEM}. Эта единица (VEM – "*vertical equivalent muon*") – величина сигнала в детекторе от мюона, падающего в вертикальном направлении, была определена моделированием с использованием GEANT4 [12]. Экспериментальные сигналы $s(600, \theta)$ умножались на $\sec(\theta)$ и, таким образом, переводились в сигналы $s_n(600, \theta)$ в единицах E_{VEM}. На основе сигнала $s_n(600, \theta)$ и расчетного коэффициента $a(\theta)$, который вычислялся в тех же единицах E_{VEM}, определялась оценка E_n энергии E_0 наклонного ливня.

$$E_n = a(\theta) \cdot s_n(600, \theta). \tag{2}$$

Сначала были рассчитаны коэффициенты $a(\theta)$ для фиксированных углов 0°, 15°, 30° и 45° в области энергий 10^{17}–10^{20} эВ в рамках моделей взаимодействия адронов QGSJETII-04 [13] и EPOS LHC [14] с помощью пакета CORSIKA [15] и таблиц сигналов от различных вторичных частиц ливня [16, 17]. Затем результаты этих расчетов аппроксимировались квадратичным полиномом методом наименьших квадратов:

$$a(\theta) = a_0 + a_1(\sec\theta - 1) + a_2(\sec\theta - 1)^2. \tag{3}$$

Были обработаны 116 ливней из части банка данных ЯКУ, любезно предоставленной нам М.И. Правдиным и С.П. Кнуренко. Отбирались зарегистрированные в разные годы ливни с зенитным углом $\theta \le 45°$. В результате выполнения описанных выше процедур были получены по 116 оценок E_n энергии E_0 для каждой из использованных моделей. Далее находились отношения $R = E_{\text{Yak}}/E_n$ оценок E_{Yak} из банка данных к новым оценкам E_n и средние значения этих отношений для двух групп ливней с энергиями меньше $4.6 \cdot 10^{18}$ эВ и больше этого значения.

Для оценки погрешностей моделей QGSJETII-04, EPOS LHC, QGSJET01 [18] и QGSJETII-03 [19, 20] было проведено их тестирование по спектрам атмосферных мюонов. Поскольку каждый ливень – индивидуальное событие, то надо учитывать флуктуации в развитии ливней, что, согласно работам [11, 16, 17], приведет к уменьшению оценки энергии. В данной работе эти флуктуации не учитывались.

3. Результаты расчета и обсуждение. Результаты моделирования позволили определить величину экспериментальной единицы E_{VEM} в стандартных единицах $E_{\text{VEM}} = 10.8$ МэВ [16, 17]. Отметим, что в [5, 6] E_{VEM} определяется как $E_1 = 11.75$ МэВ. Но это значение – потери энергии в сцинтилляторе, которые, как показало моделирование, на $\sim 10\,\%$ превышают энергию, выделившуюся в сцинтилляторе. Очевидно, часть выделившейся энергии проносится частицами каскада через сцинтиллятор в грунт. Нужно также иметь в виду, что в работах [5, 6, 21] сигналы $s(600, \theta)$ в наклонных ливнях с разными зенитными углами θ измеряются в разных единицах, равных $E_{\text{EM}} = E_1 \cdot \sec(\theta)$. Очевидно, что эта единица – сигнал от мюона, проходящего через детектор под зенитным углом θ. В [5, 6] величина сигнала $s(600, \theta)$ в единицах E_{EM} пересчитывается в расчетный сигнал $s(600, 0°)$ для вертикального ливня в единицах E_1. Единица E_{EM} используется для пересчета сигнала от наклонного ливня в сигнал в детекторе, расположенном в плоскости, перпендикулярной оси ливня. Это было бы верно, если бы все вторичные частицы были мюонами. Однако, как показывают расчеты [16, 17], основная доля сигнала образуется за счет гамма-квантов и электронов. Ясно, что электроны с энергией ~ 10 МэВ приведут к сигналу ~ 10 МэВ независимо от зенитного угла. В случае гамма-квантов сигнал также не будет увеличиваться пропорционально $\sec(\theta)$ и поэтому использование единицы измерения E_{EM} существенно уменьшает как эту электронно-фотонную часть сигнала, так и весь сигнал наклонного ливня. Это, в свою очередь, приводит к значительному уменьшению величины пробега для поглощения λ как части, так и самого этого сигнала и, как следствие, к увеличению оценки E_{Yak} энергии E_0 наклонных ливней. Поэтому новые оценки E_n энергии E_0 ливней по сигналу $s_n(600, \theta)$, измеренному в единицах E_{VEM}, и зенитному углу θ с использованием формулы (2) представляются более предпочтительными.

Пример аппроксимации ФПР сигналов $s(r, \theta_0)$ квадратичным полиномом (1) показан на рис. 1 для наклонного ливня № 27 с зенитным углом $\theta_0 = 41.7°$

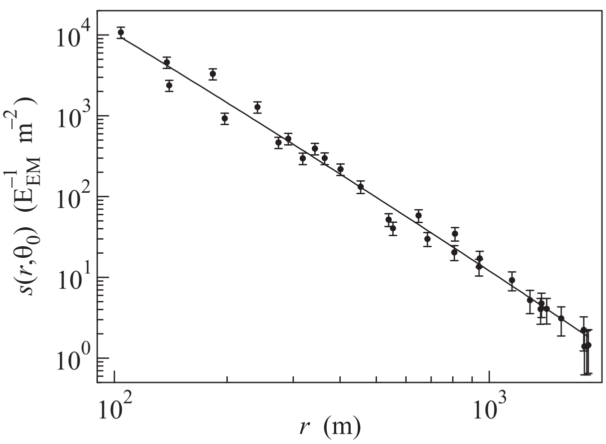

Рис. 1. Аппроксимация сигналов $s(r, \theta_0)$ квадратичным полиномом (1)

из банка данных 1974 г. Согласно этой аппроксимации $s(600, 41.7°) = 56.65$, что отличается на ~ 10 ,% от величины 51.2, приведенной в банке для другой аппроксимации сигналов. Этот сигнал в единицах E_{VEM} становится равным $s_n(600, 41.7°) = s(600, 41.7°) \cdot \sec(\theta) = 75.86$.

Коэффициенты $a(\theta)$ вычислялись по формуле (3) для каждого ливня с известным зенитным углом θ. Коэффициенты a_0, a_1 и a_2 представлены в табл. 1 для двух моделей.

Таблица 1. Значения коэффициентов a_0, a_1 и a_2

Модель	a_0	a_1	a_2
QGSJETII-04	2.890	0.510	13.428
EPOS LHC	2.693	0.347	10.297

Оценка энергии E_0 ливня № 27 равна $E_n = 3.5 \times 10^{19}$ эВ согласно модели QGSJETII-04, а отношение оценок R равно 1.57. Таким образом, видно, что предлагаемый метод приводит к существенному уменьшению оценок E_{Yak} энергии E_0 наклонных ливней по причинам, рассмотренным выше. Что касается вертикальных ливней, то имеется отмеченное выше отличие единиц E_{VEM} и E_1. В таблице 2 приведены значения коэффициента $a(0°)$ для вертикальных ливней для двух моделей из работ [5, 6, 21] и результаты [16, 17].

Таблица 2. Значения коэффициентов $a(0°)$

Модель	[5, 6]	[21]	[21]/k	[16, 17]
QGSJETII-04	3.52	3.19	2.93	2.88
EPOS LHC	3.74	2.87	2.64	2.59
Погрешность	±0.1			±0.15

Видно, что после правки значений во второй колонке на коэффициент $k = E_1/E_{\mathrm{VEM}}$ в третьей колонке получаются значения, хорошо согласующиеся с данными [16, 17].

Рисунок 2 демонстрирует отношения результатов расчета спектра атмосферных вертикальных мюонов

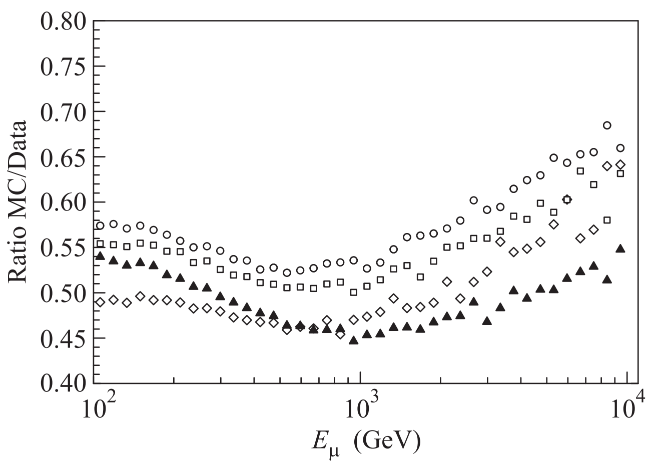

Рис. 2. Отношения расчетных спектров вертикальных мюонов к данным экспериментов: ◇ – QGSJET01; ▲ – QGSJETII-03; □ – QGSJETII-04; ○ – EPOS LHC

для моделей QGSJETII-04, QGSJETII-03, QGSJET01 и EPOS LHC к гладкой аппроксимации экспериментальных данных [22–25]. Из рисунка 2 видно, что все модели предсказывают разные значения потока мюонов высокой энергии. Калибровка рассчитанной оценки энергии согласно модели QGSJETII-03 по сигналу на расстоянии 800 м от оси ливня на установке Telescope Array (TA) с помощью флуоресцентного света показала, что эту оценку энергии следует понизить в 1.27 раза [26]. Из рисунка 2 ясно, что в случае моделей QGSJETII-04 и EPOS LHC эта поправка должна быть меньше. Учитывая разные высоты наблюдений и расстояния от оси ливней, на которых определяются сигналы, эту поправку можно оценить как 10–20 % и отнести к погрешности оценки энергии E_0. В работах [27–30] из-за случайной ошибки в параметрах атмосферы приведены неправильные результаты тестирования моделей. Авторы этих работ приносят свои извинения.

Для получения энергетического спектра ЯКУ совокупность обработанных предлагаемым подходом ливней из данных банка была поделена на 2 примерно равные части. Одна часть ливней имела энергии $< 4.6 \cdot 10^{18}$ эВ, а другая часть – больше. Для моделей QGSJETII-04 и EPOS LHC были определены средние значения коэффициентов R, равные, соответственно, 1.67 и 1.85 для первой части и 1.51 и 1.68 для второй. На основе анализа, проведенного в [21], оценки энергии из банка данных ЯКУ были уменьшены в ~ 1.28 раза. С учетом этого коэффициенты R также были уменьшены в 1.28 раза, что привело к значениям 1.30 и 1.45 для первой части и 1.18 и 1.33 для второй, показывающим, во сколько раз надо снизить оценки энергии из работы [21]. При вычислениях энергетического спектра с этими коэффициентами использовались показатели спектра $\gamma_1 = 3.24$ и $\gamma_2 = 2.67$ для первой и второй частей спектра из [31].

На рисунке 3 представлены результаты вычислений энергетического спектра в рамках моделей QGSJETII-04 и EPOS LHC. Для сравнения приведены данные из работ TA, Pierre Auger Observatory (PAO) [31–33] и [34], полученные с помощью наблюдений ИВЧ. Из рисунка 3 видно, что для модели QGSJETII-04 имеется прекрасное согласие для первой части спектров, полученных на ЯКУ по сигналам НСД и данным измерений ИВЧ [34], и результатам [31]. Для второй части спектра можно говорить об удовлетворительном согласии, имея в виду большие погрешности. Спектры, полученные в рамках модели EPOS LHC, хорошо согласуются с данными [32, 33] в первой части спектра и с [31] – во второй.

4. Выводы. Предложен новый метод оценивания энергии ШАЛ по сигналам в НСД на расстоянии 600 м от оси ливня. Впервые показано, что в рамках моделей QGSJETII-04 и EPOS LHC на основе предложенного метода можно согласовать энергетический спектр, полученный по многолетним данным измерений на ЯКУ, с мировыми данными [31–33] в области энергий $6 \cdot 10^{17}$–$2 \cdot 10^{19}$ эВ. Впервые показана согласованность спектров, измеренных на ЯКУ по сигналам в НСД и результатами наблюдений ИВЧ, в рамках модели QGSJETII-04. За много лет измерений на ЯКУ накоплены уникальные данные в области энергий, в которой предполагается переход от галактических к внегалактическим космическим лучам. В результатах измерений содержатся данные о природе частиц космических лучей и о возможных источниках. В настоящее время на крупнейших установках проводятся модернизации с целью регистрации космических лучей в области энергий $< 10^{18}$ эВ. Поэтому проведенное тестирование новой методики на части банка данных ЯКУ позволяет применить ее ко всему банку и получить новые научные результаты.

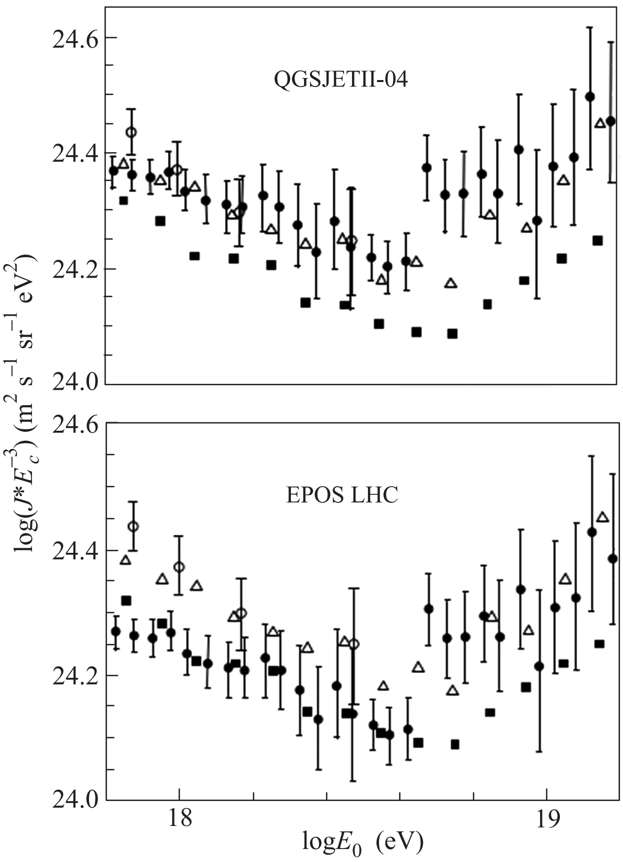

Рис. 3. Энергетические спектры частиц ПКИ: • – оценки по сигналам в НСД; ○ – [34], △ – [31], ■ – [32]

В заключение авторы выражают глубокую благодарность М.И. Правдину и С.П. Кнуренко за предоставленные части банка данных ЯКУ для тестирования нового метода.

1. L. G. Dedenko, A. V. Glushkov, S. P. Knurenko, I. T. Makarov, M. I. Pravdin, D. A. Podgrudkov,

I. E. Sleptsov, T. M. Roganova, and G. F. Fedorova, JETP Lett. **90**, 691 (2009).
2. L. G. Dedenko, A. V. Glushkov, S. P. Knurenko, I. T. Makarov, M. I. Pravdin, D. A. Podgrudkov, I. E. Sleptsov, T. M. Roganova, and G. F. Fedorova, Pisma ZhETF **90**, 787 (2009).
3. A. V. Glushkov, V. P. Egorova, A. A. Ivanov, S. P. Knurenko, A. D. Krasilnikov, I. T. Makarov, A. A. Mikhailov, V. V. Olzoyev, V. V. Pisarev, M. I. Pravdin, A. V. Sabourov, I. E. Sleptsov, and G. G. Struchkov, in *Proc. of the 28-th ICRC*, Tsukuba (2003), v. 1, p. 389.
4. A. V. Glushkov and M. I. Pravdin, JETP **103**, 831 (2006).
5. A. V. Glushkov, M. I. Pravdin, and A. V. Sabourov, JETP Lett. **99**, 431 (2014).
6. A. V. Glushkov, M. I. Pravdin, and A. V. Sabourov, Pisma ZhETF **99**, 501 (2014)].
7. G. Clark, H. L. Bradt, M. La Pointeб V. Domingo, I. Escobar, K. Murakami, K. Suga, Y. Toyoda, and J. Hersil, in *Proc. of the 8th ICRC*, Kyoto (1963), v. 4, p. 65.
8. L. G. Dedenko, in *Proc. of the 14th ICRC*, Munchen (1975), v. 8, p. 2857.
9. T. K. Gaisser and A. M. Hillas, in *Proc. of the 15th ICRC*, Plovdiv (1977), v. 8, p. 353.
10. Г. Т. Зацепин, в *Трудах 6 Межд. конф. по косм. лучам*, М. (1960), т. 2, с. 212.
11. Л. Г. Деденко, Г. Т. Зацепин, в *Трудах 6 Межд. конф. по косм. лучам*, М. (1960), т. 2, с. 222.
12. The GEANT 4 Collab., http://geant4.web.cern.ch/geant4/support/gettingstarted.shtml
13. S. S. Ostapchenko, Phys. Rev. D **83**, 014018 (2011).
14. T. Pierog, Iu. Karpenko, J. M. Katzy, E. Yatsenko, and K. Werner, arXiv:1306.0121 [hep-ph] (2013).
15. D. Heck, J. Knapp, J.-N. Capdevielle, G. Schatz, and T. Thouw, Report FZKA 6019 Forschungszentrum Karlsruhe (1998).
16. N. V. Anutin, L. G. Dedenko, T. M. Roganova, and G. F. Fedorova, Phys. Atomic Nuclei **80**, 260 (2017).
17. N. V. Anutin, L. G. Dedenko, T. M. Roganova, and G. F. Fedorova, Yad. Fiz. **80**, 1 (2017).
18. N. N. Kalmykov, S. S. Ostapchenko, and A. I. Pavlov, Nucl. Phys. Proc. Suppl B **52**, 17 (1997).
19. S. S. Ostapchenko, Phys. Rev. D **74**, 014026 (2006).
20. S. S. Ostapchenko, arXiv:hep-ph/0505259.
21. A. V. Sabourov, A. V. Glushkov, M. I. Pravdin, Yu. A. Egorov, A. A. Ivanov, S. P. Knurenko, A. D. Krasilnikov, I. T. Makarov, V. P. Mokhnachevskaya, A. A. Mikhailov, S. V. Matarkin, Z. E. Petrov, I. S. Petrov, I. E. Sleptsov, G. G. Struchkov, and L. V. Timofeev, in *Proc. of the 35th ICRC*, Bexco, Busan, Korea (2017), PoS (ICRC2017) 552.
22. P. Achard, O. Adriani, M. Aguilar-Benitez et al. (The L3 Collaboration), Phys. Lett. B **598**, 15 (2004).
23. P. Achard, O. Adriani, M. Aguilar-Benitez et al. (The L3 Collaboration), arXiv:hep-ex/0408114v1).
24. M. Ambrosio, R. Antolini, G. Auriemma et al. (The MACRO Collaboration), Phys. Rev. D **52**, 3793 (1995).
25. M. Aglietta, B. Alpat, E. D. Alieva et al. (The LVD Collaboration), arXiv:hep-ex/9806001v1 (1998).
26. D. Ivanov (Telescope Array Collaboration), in *Proc. of the 34th ICRC*, Hague, Netherlands (2015), PoS (ICRC2015) 349.
27. L. G. Dedenko, T. M. Roganova, and G. F. Fedorova, JETP Lett. **100**, 223 (2014).
28. L. G. Dedenko, T. M. Roganova, and G. F. Fedorova, Pisma ZhETF **100**, 247 (2014)].
29. L. G. Dedenko, T. M. Roganova, and G. F. Fedorova, Phys. Atomic Nuclei **78**, 840 (2015).
30. L. G. Dedenko, T. M. Roganova, and G. F. Fedorova, Yad. Fiz. **78**, 894 (2015)].
31. R. U. Abbasi, M. Ahe, T. Abu-Zayyad, et al., (The Telescope Array Collaboration), Astropart. Phys. **80**, 131 (2016).
32. Inés Valiño (for the Pierre Auger Collaboration), in *Proc. of the 34th ICRC*, Hague, Netherlands (2015), PoS (ICRC2015) 271.
33. Inés Valiño (for the Pierre Auger Collaboration), arXiv:1509.03732.
34. S. P. Knurenko and A. V. Sabourov, EPJ Web Conferences **53**, 04004 (2013).