Письма в ЖЭТФ, том 109, вып. 9, с. 579 – 583 © 2019 г. 10 мая

Массовый состав космических лучей с энергией выше 10^{17} эВ по данным мюонных детекторов Якутской установки

А. В. Глушков[1)], А. В. Сабуров[1)]

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю. Г. Шафера Якутского научного центра, 677980 Якутск, Россия

Поступила в редакцию 22 февраля 2019 г.
После переработки 22 марта 2019 г.
Принята к публикации 27 марта 2019 г.

Исследовано пространственное распределение мюонов в широких атмосферных ливнях от космических лучей с энергией выше 10^{17} эВ, зарегистрированных на Якутской установке за период непрерывных наблюдений с 1986 по 2016 г. Измерения мюонной компоненты проводились с помощью подземных сцинтилляционных детекторов с порогом ~ 1.0 ГэВ. Проведено сравнение экспериментальных значений плотности потока мюонов на расстоянии 300 м от оси ливня с расчетными, полученными в рамках нескольких моделей адронных взаимодействий при сверхвысоких энергиях. Наилучшее согласие эксперимента и теории наблюдается в случае моделей QGSJet01 и QGSJet II-04. В области энергий $(1-30)\cdot 10^{17}$ эВ наблюдается изменение массового состава космических лучей от ядер средней группы к чисто протонному.

DOI: 10.1134/S0370274X19090017

1. Введение. Космические лучи (КЛ) сверхвысоких энергией (выше 10^{15} эВ) активно исследуются во всем мире более 50 лет [1]. До сих пор точно не известен их массовый состав, без знания которого трудно понять характер ядерных взаимодействий в этой области энергий. Для его оценки используются различные параметры широких атмосферных ливней (ШАЛ), чувствительные к массовому составу КЛ. На Якутской установке это делается с помощью функций пространственного распределения (ФПР) электронной, мюонной и черенковской компонент ШАЛ (см., например, [2–7]). Ключом к решению проблемы состава КЛ служит глубина максимума каскадной кривой ливня $x_{\max}$, которая связана с атомным номером A первичных частиц простым соотношением, следующим из принципа нуклонной суперпозиции [8]:

$$\langle \ln A\rangle = \frac{x^{\mathrm{p}}_{\max} - x^{\exp}_{\max}}{x^{\mathrm{p}}_{\max} - x^{\mathrm{Fe}}_{\max}} \ln 56, \qquad (1)$$

где величины $x_{\max}$ получены на эксперименте (exp) и расчетным путем для первичных протонов (p) и ядер железа (Fe). Здесь не обойтись без теоретических представлений о развитии ШАЛ. В работе [9] были рассчитаны отклики наземных и подземных сцинтилляционных детекторов Якутской установки от частиц ШАЛ, инициированных КЛ с энергией $E_0 \geq 10^{17}$ эВ. Пространственные распределения ливневых частиц были получены в рамках моделей QGSJet01 [10], QGSJet II-04 [11], EPOS-LHC [12] и SIBYLL-2.1 [13] с помощью кода CORSIKA [14].

2. Полученные результаты. Доля мюонов, определенная на расстоянии 300 м от оси ШАЛ, является параметром, наиболее чувствительным к массовому составу КЛ. На Якутской установке она хорошо определяется из измеренных ФПР при энергиях $E_0 \geq 10^{17}$ эВ как $\rho_\mu(300)/\rho_s(300)$, где $\rho_\mu(300)$ и $\rho_s(300)$, соответственно, плотности мюонов и частиц ШАЛ, измеренные подземными и наземными сцинтилляционными детекторами на расстоянии $r = 300$ м от оси.

В настоящий анализ вошли показания трех мюонных детекторов с порогом $\epsilon_{\mathrm{thr}} \geq 1$ ГэВ и площадью 20 м^2 каждый, расположенные на расстояниях $0.5-1.0$ км от центра установки. Эти детекторы продемонстрировали самую стабильную работу за весь рассмотренный период времени.

Плотности частиц, из которых вычислялось содержание мюонов в ШАЛ, находились из средних ФПР ливней с зенитными углами $\theta \leq 38.7^\circ$ ($\langle\cos\theta\rangle = 0.9$). Методика построения ФПР для получения $\rho_s(300)$ изложена в работе [15]. Энергия первичных частиц находилась из соотношений

$$E_0 = (3.76 \pm 0.3)\cdot 10^{17}\cdot \rho_s(600, 0^\circ)^{1.02\pm 0.02}, \qquad (2)$$

$$\rho_s(600, 0^\circ) = \rho_s(600,\theta)\cdot \exp\left(\frac{(\sec\theta - 1)\cdot 1020}{\lambda}\right). \quad (3)$$

1) e-mail: glushkov@ikfia.ysn.ru; tema@ikfia.ysn.ru

Пробег поглощения λ показан на рис. 1 [16], $\rho_s(600,\theta)$ – плотность частиц ШАЛ с зенитным углом θ, измеренная наземными детекторами на расстоянии 600 м от оси.

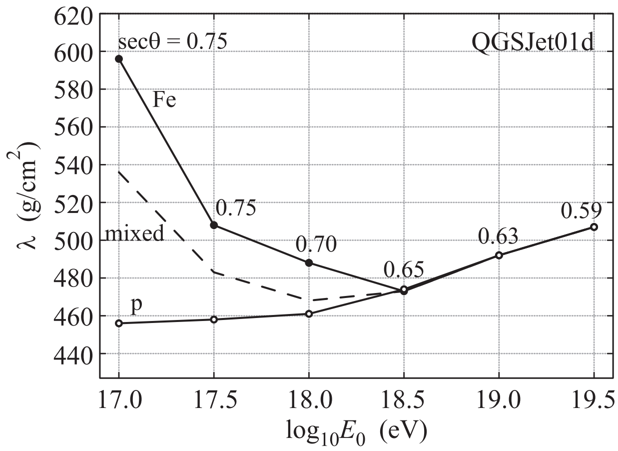

Рис. 1. Энергетическая зависимость пробега поглощения в (3) при пересчете измеренной плотности частиц от наклонных к вертикальным ливням. Результаты расчетов для первичных протонов, смешанного состава и ядер железа в рамках модели QGSJet01. Цифры – предельно допустимые зенитные углы

Средние ФПР мюонов строились аналогично [15] в интервалах энергии с шириной $h = \Delta \lg E_0 = 0.2$, которые последовательно сдвигались на величину $0.5 \cdot h$, для более детального исследования согласия эксперимента с той или иной моделью. Величины $\rho_\mu(300)$ получены из аппроксимаций средних ФПР. При построении ФПР плотности мюонов в отдельных ливнях умножались на нормировочный коэффициент $\langle E_0\rangle/E_0$ и усреднялись между собой в интервалах расстояния от оси шириной $\Delta \lg r = 0.04$. Средние плотности мюонов находились по формуле:

$$\langle \rho_\mu(r_i)\rangle = \sum_{n=1}^{N_1} \frac{\rho_n(r_i)}{N_1+N_0}, \tag{4}$$

где N_1 и N_0 – число ненулевых и нулевых показаний мюонных детекторов в интервалах расстояния от оси $(\lg r_i, \lg r_i + 0.04)$. Нулевые показания относятся к случаям, когда детекторы не зарегистрировали ни одного мюона, но находились в режиме ожидания. Средние ФПР мюонов аппроксимировались функцией:

$$\rho_\mu(r,\theta) = f_\mu(r,\theta)\cdot\left(\frac{2000+600}{2000+r}\right)^{6.5}, \tag{5}$$

где $f_\mu(r,\theta)$ — функция Грейзена [17]:

$$f_\mu(r,\theta) = \rho_\mu(600,\theta)\cdot\left(\frac{600}{r}\right)^{0.75}\times \times\left(\frac{r_0+600}{r_0+r}\right)^{b_\mu-0.75}, \tag{6}$$

где $r_0 = 280$ м, b_μ – свободный параметр. Значения b_μ и $\rho_\mu(600,\theta)$ в (6) в каждой средней ФПР находились в ходе χ^2-минимизации. Из полученных аппроксимаций находились искомые значения $\rho_\mu(300,\theta)$. На рисунке 2 символами изображены ФПР мюонов с порогом 1.0 ГэВ, полученные в рамках модели QGSJet01 для первичных протонов в интервале энергий 10^{17}–$10^{19.5}$ эВ и $\cos\theta = 0.9$; линиями обозначены аппроксимации (6), полученные в результате χ^2-минимизации.

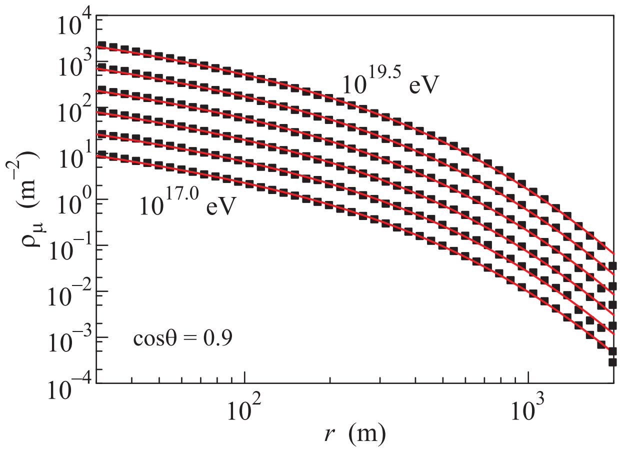

Рис. 2. (Цветной онлайн) ФПР мюонов с порогом ~ 1 ГэВ в ливнях с энергиями $10^{17} - 10^{19.5}$ эВ, вызванных первичными протонами. Результат расчетов в рамках модели QGSJet01. Линиями показаны аналитические аппроксимации вида (6)

Процедура построения ФПР по данным моделирования подробно описана в работах [9, 16]. Вкратце можно сказать, что восстановление $\rho_\mu(300)$ на эксперименте и в расчетах проводилось одинаково из средних экспериментальных и расчетных ФПР с теми флуктуациями, которые реально присутствовали в обоих случаях.

На рисунке 3 точками показаны экспериментальные величины $d = \rho_\mu(300)/\rho_s(300)$ для рассмотренной выше выборки ливней. Ошибки включают в себя всю их совокупность, связанную со статистикой ливней и методикой их усреднения при построении ФПР обеих компонент ШАЛ. Линиями показаны результаты расчетов в рамках различных моделей адронных взаимодействий при сверхвысоких энергиях для первичных протонов и ядер железа. В таблице 1 приведены соответствующие этому рисунку значе-

Таблица 1. Значения масштабного параметра z, вычисленные из плотностей потока мюонов на расстоянии от оси ШАЛ 300 м согласно соотношению (7) (см. рис. 3). Энергия первичных частиц E_0 оценивалась по формуле (2). В колонке "err" приведены ошибки, учитывающие как систематические, так и статистические неопределенности. В колонке $N_{\rm sh}$ приведено число ливней, вошедших в интервал с данной средней энергией.

E_0, эВ ($\times 10^{17}$)	QGSJet01		QGSJet II-04		EPOS-LHC		SIBYLL-2.1		$N_{\rm sh}$
	z	err	z	err	z	err	z	err	
1.016	0.528	0.200	0.571	0.200	0.652	0.200	0.732	0.200	5172
1.480	0.534	0.180	0.562	0.180	0.670	0.180	0.770	0.180	5644
1.910	0.460	0.160	0.521	0.160	0.632	0.160	0.719	0.160	6079
2.410	0.560	0.165	0.589	0.165	0.708	0.165	0.824	0.165	6137
3.050	0.392	0.130	0.426	0.130	0.546	0.130	0.672	0.130	6182
3.780	0.206	0.105	0.234	0.105	0.364	0.105	0.544	0.105	5685
4.770	0.208	0.100	0.253	0.100	0.385	0.100	0.560	0.100	4807
6.070	0.170	0.060	0.208	0.060	0.333	0.060	0.534	0.060	3778
7.670	0.108	0.060	0.198	0.060	0.296	0.060	0.517	0.060	2717
9.710	0.106	0.082	0.149	0.082	0.286	0.082	0.508	0.082	1881
12.30	0.100	0.060	0.140	0.060	0.276	0.060	0.517	0.060	1316
15.20	-0.044	0.065	0.046	0.065	0.167	0.065	0.431	0.065	934
19.10	0.046	0.075	0.118	0.075	0.219	0.075	0.483	0.075	600
24.20	0.088	0.088	0.190	0.088	0.276	0.088	0.552	0.088	403
31.30	-0.090	0.108	0.000	0.108	0.106	0.108	0.421	0.108	260
40.60	-0.115	0.105	-0.048	0.105	0.065	0.105	0.478	0.105	150
51.20	0.045	0.155	0.132	0.155	0.206	0.155	0.526	0.155	107
63.10	0.250	0.180	0.341	0.180	0.400	0.180	0.702	0.180	87
81.60	-0.044	0.182	0.048	0.182	0.122	0.182	0.482	0.182	60
103.0	0.045	0.362	0.134	0.362	0.204	0.362	0.562	0.362	29
136.0	0.290	0.375	0.402	0.375	0.432	0.375	0.759	0.375	16

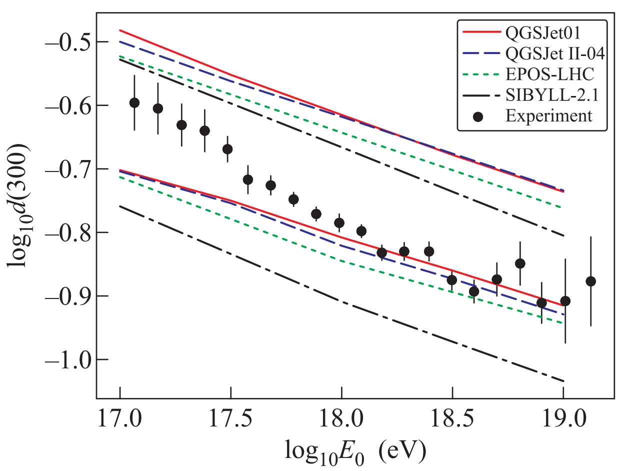

Рис. 3. (Цветной онлайн) Энергетическая зависимость доли мюонов $d(300)$ с порогом ~ 1.0 ГэВ на расстоянии 300 м от оси в ливнях с $\langle \cos\theta \rangle = 0.90$. Результаты расчетов в рамках нескольких моделей адронных взаимодействий

ния масштабного коэффициента z, введенного в работе [18]:

$$z = \frac{\ln d_{\rm exp} - \ln d_{\rm p}}{\ln d_{\rm Fe} - \ln d_{\rm p}}, \tag{7}$$

где использованы полученные в эксперименте (exp) и расчетах величины d для первичных протонов (p) и ядер железа (Fe) в разных моделях адронных взаимодействий. Они связаны с соотношением (1) удобной для оценки массового состава КЛ формулой:

$$\ln A = z \ln 56. \tag{8}$$

На рисунке 4 показаны зависимости массового состава КЛ от первичной энергии, полученные на разных установках ШАЛ. Сплошными кружками обозначены наши оценки $\langle \ln A \rangle$, полученные из соотношений (7) и (8) для рассмотренных на рис. 3 моделей. Светлыми кружками показаны наши оценки массового состава КЛ из формы ФПР, измеренной наземными сцинтилляционными детекторами [15]. Остальными символами показаны оценки $\langle \ln A \rangle$, полученные из соотношения (8) с помощью масштабного коэффициента z [18] для экспериментов IceCube [19], NEVOD-DECOR [20, 21], ШАЛ-МГУ [22] и Обсерватории Пьера Ожэ (PAO) [23–25], в которых измерялась мюонная компонента ШАЛ. Также приведены результаты установки KASCADE за период наблюдений с мая 1998 г. по декабрь 1999 г. [26], данные установки Тунка-133, полученные из ФПР черенков-

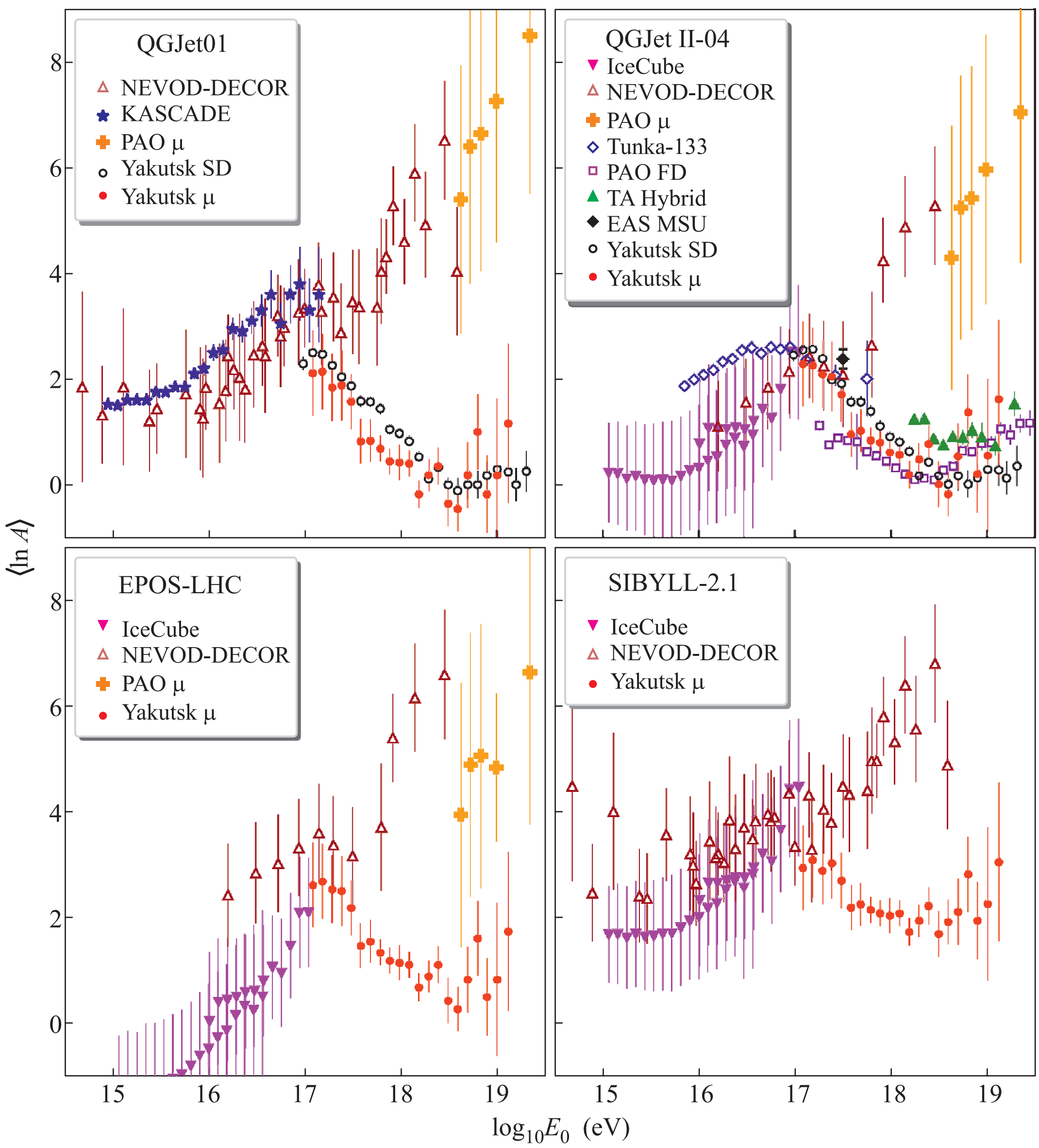

Рис. 4. (Цветной онлайн) Энергетические зависимости массового состава КЛ, полученные на разных установках ШАЛ. Пустые кружки — оценки, полученные на Якутской установке по данным наземных детекторов (SD) [15], закрашенные кружки – оценки по мюонной компонете ШАЛ (μ). Здесь же приведены оценки, полученные из масштабного параметра z [18] для экспериментов IceCube [19], NEVOD-DECOR [20, 21], PAO [23–25] и ШАЛ-МГУ [22]. Также приведены данные установок KASCADE [26], Тунка-133 [27], флюоресцентной части PAO (FD) [28] и TA [29, 30]

ского излучения ШАЛ [27], оценки по данным флюоресцентных детекторов установки PAO [28] и измерения установки Telescope Array (TA) [29, 30].

3. Заключение. По многолетним измерениям мюонной компоненты широких атмосферных ливней с порогом $\epsilon_{\rm thr} \simeq 1.0$ ГэВ на Якутской установке были получены оценки массового состава космических лучей в области энергий $E_0 \simeq 10^{17}$–$10^{19.5}$ эВ, которая не очень богата статистикой событий. Из рисунка 4 видно, что согласно моделям QGSJet01 и QGSJet II-04 с ростом энергии в интервале $(1 - 30) \times 10^{17}$ эВ состав КЛ быстро меняется в сторону легких ядер. Вероятно, это связано с переходом от галактической компоненты КЛ к внегалактической. Из наших данных и оценок TA [29, 30] можно предположить, что при $E_0 \geq 3 \cdot 10^{18}$ эВ первичными частицами являются, преимущественно, протоны. Однако делать строгий вывод пока преждевременно. Данные PAO [28] указывают на утяжеление первичных ядер с энергией, а в области ниже $\sim 3 \times 10^{17}$ эВ они противоречат нашим оценкам, а также оценкам, полученным на установках Тунка-133 [27] и KASCADE [27]. Существенное расхождение результатов экспериментов NEVOD-DECOR [20, 21] и PAO [23–25] с вышеупомянутыми результатами, вероятно, обусловлено особенностями применяемых там методик. Здесь нужны дальнейшие всесторонние исследования, которые мы намереваемся продолжить.

1. P. K. F. Grieder, *Extensive Air Showers: High Energy Phenomena and Astrophysical Aspects*, Springer, Berlin (2010); doi:10.1007/978-3-540-76941-5.
2. A. V. Glushkov, V. M. Grigoriev, N. N. Efimov, M. I. Pravdin, O. S. Diminstein, and V. P. Sokurov, in: *Proc. of the 16th ICRC*, Kyoto, 1979 **8**, 158, ed. by S. Miyake and N. Gakujutsu Kaigi, Tokyo (1979); ADS:1979ICRC....8..158G.
3. А. В. Глушков, *Пространственное распределение и полный поток черенковского излучения ШАЛ с первичной энергией $E_0 \sim 10^{17}$ эВ*, Дисс... канд. наук. НИИЯФ МГУ, Москва (1982).
4. А. В. Глушков, Л. Г. Деденко, Н. Н. Ефимов, Н. Н. Ефремов, И. Т. Макаров, П. Д. Петров, М. И. Правдин, Изв. АН СССР. Сер. физ. **55**, 2166 (1986).
5. А. В. Глушков, М. И. Правдин, И. Е. Слепцов, В. Р. Слепцова, Н. Н. Калмыков, ЯФ **63**, 1557 (2000).
6. А. В. Глушков, А. В. Сабуров, Письма в ЖЭТФ **98** 661 (2013); doi:10.7868/S0370274X13220025.
7. E. G. Berezhko, S. P. Knurenko, and L. T. Ksenofontov, Astropart. Phys. **36**, 31 (2013); doi:10.1016/j.astropartphys.2012.04.014.
8. J. R. Hörandel, J. Phys.: Conf. Ser. **47**, 41 (2006); doi:10.1088/1742-6596/47/1/005.
9. А. В. Сабуров, *Пространственное распределение частиц ШАЛ с энергией выше 10^{17} эВ по данным Якутской установки*, Дисс... канд. наук. ИЯИ РАН, Москва (2018).
10. N. N. Kalmykov, S. S. Ostapchenko, and A. I. Pavlov, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) **52**, 17 (1997); doi:10.1016/S0920-5632(96)00846-8.
11. S. Ostapchenko, Phys. Rev. D. **83**, 014018 (2011); doi:10.1103/PhysRevD.83.014018; arXiv: 1010.1869 [hep-ph].
12. T. Pierog, Iu. Karpenko, J. M. Katzy, E. Yatsenko, and K. Werner, Phys. Rev. C **92**, 034906 (2015); doi:10.1103/PhysRevC.92.034906; arXiv: 1306.0121 [hep-ph].
13. E.-J. Ahn, R. Engel, T. K. Gaisser, P. Lipari, and T. Stanev, Phys. Rev. D **80**, 094003 (2009); doi:10.1103/PhysRevD.80.094003; arXiv: 0906.4113 [hep-ph].
14. D. Heck, J. Knapp, J. N. Capdevielle, G. Schatz and T. Thouw, Forschungszentrum Karlsruhe Report **FZKA 6019**, Karlsruhe (1988).
15. А. В. Глушков, М. И. Правдин, А. В. Сабуров, Письма в АЖ **44**, 643 (2018); doi: 10.1134/S0320010818100029.
16. А. В. Глушков, М. И. Правдин, А. В. Сабуров, ЯФ **81**, 535 (2018); doi:10.1134/S0044002718040049.
17. K. Greisen, Annu. Rev. Nucl. Sci. **10**, 63 (1960); doi:10.1146/annurev.ns.10.120160.000431.
18. H. P. Dembinsky, J. C. Arteaga-Velázquez, L. Cazon et al. (for the WHISP group), in: *Proc. of the UHECR2018*, Paris, 2018, Talk id: 64367, EPJ Web of Conf. (2019) (in print); arXiv: 1902.08124 [astro-ph.HE]
19. J. G. Gonzales, M. G. Aartsen, M. Ackermann et al. (IceCube Collab.), in: *Proc. of the 20th ISVHECRI*, Nagoya (2018), Talk id:2964861, EPJ Web of Conf. (2019) (in print).
20. А. Г. Богданов, Д. М. Громушкин, Р. П. Кокоулин, Дж. Маннокки, А. А. Петрухин, О. Сааведра, Дж. Тринкеро, Д. В. Чернов, В. В. Шутенко, И. И. Яшин, ЯФ **73**, 1904 (2010) [A. G. Bogdanov, D. M. Gromushkin, R. P. Kokoulin, G. Mannocchi, A. A. Petrukhin, O. Saavedra, G. Trinchero, D. V. Chernov, V. V. Shutenko, and I. I. Yashin, Phys. Atom. Nucl. **73**, 1852 (2010); doi:10.1134/S1063778810110074].
21. A. G. Bogdanov, R. P. Kokoulin, G. Mannocchi, A. A. Petrukhin, O. Saavedra, V. V. Shutenko, G. Trinchero, and I. I. Yashin, Astropart. Phys. **98**, 13 (2018); doi:10.1016/j.astropartphys.2018.01.003.
22. Yu. A. Fomin, N. N. Kalmykov, I. S. Karpikov, G. V. Kulikov, M. Yu. Kuznetsov, G. I. Rubtsov, V. P. Sulakov, and S. V. Troitsky, Astropart. Phys. **92**, 1 (2017); doi:10.1016/j.astropartphys.2017.04.001; arXiv:1609.05764 [astro-ph.HE].
23. A. Aab, P. Abreu, M. Aglietta et al. (Pierre Auger Collab.), Phys. Rev. D **91**, 032003 (2015); doi:10.1103/PhysRevD.91.032003; arXiv: 1408.1421 [astro-ph.HE].
24. A. Aab, P. Abreu, M. Aglietta et al. (Pierre Auger Collab.); Phys. Rev. Lett. **117**, 192001 (2016); doi:10.1103/PhysRevLett.117.192001; arXiv: 1610.08509 [hep-ex].
25. S. Müller, A. Aab, P. Abreu et al. (Pierre Auger Collab.), in: *Proc. of the UHECR2018*, Paris (2018); EPJ Web of Conf. (2019) (in print); id:65721.
26. H. Ulrich, T. Antoni, W. D. Apel et al. (KASCADE Collab.), in: *Proc. 27th ICRC*, Hamburg, **2**, 97 (2001), ed. by K.-H. Kampert, G. Hainzelmann, and C. Spiering, Copernicus, Berlin (2001); ADS:2001ICRC....1...97U.
27. V. V. Prosin, S. F. Berezhnev, N. M. Budnev et al. (Tunka Collab.). Nucl. Instr. Meth. A **756**, 94 (2014); doi:10.1016/j.nima.2013.09.018.
28. J. Bellido for the Pierre Auger Collaboration, in: *Proc. of the 35th ICRC*, Busan (2017). PoS(ICRC2017)506; doi:10.22323/1.301.0506.
29. R. U. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad et al. (Telescope Array Collab.), ApJ **858**, 76 (2018); doi:10.3847/1538-4357/aabad7; arXiv:1801.09784 [astro-ph.HE].
30. R. U. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad et al. (Telescope Array Collab.), Phys. Rev. D **99**, 022002 (2019); doi:10.1103/PhysRevD.99.022002; arXiv:1808.03680 [astro-ph.HE].