

## ОЦЕНКА ДОЛИ $p + \text{He}$ В МАССОВОМ СОСТАВЕ ПЕРВИЧНОГО КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ $E_0 = 1\text{--}100$ ПэВ ПО СЕМЕЙСТВАМ $\gamma$ -КВАНТОВ С ГАЛО

© 2020 г. В. С. Пучков, С. Е. Пятовский\*

*Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 28.07.2019 г.; после доработки 11.09.2019 г.; принята к публикации 16.09.2019 г.

В статье проанализированы характеристики семейств  $\gamma$ -квантов с гало (“гало”), наблюдаемые в стволах широких атмосферных ливней (ШАЛ). События получены в эксперименте РЭК ПАМИР, характеристики событий изучены на расстояниях до  $\sim 10$  см от оси ШАЛ с разрешением  $\sim 30$  мкм. Изучение параметров событий в стволах ШАЛ методом гало позволило проанализировать массовый состав первичного космического излучения (ПКИ) при  $E_0 = 10$  ПэВ и сделать выводы о доле легких ядер в ПКИ, слабо зависящих от модели прохождения ШАЛ через атмосферу. Из анализа семейств  $\gamma$ -квантов с гало и многоцентровых гало, полученных в рентгеноэмульсионной камере (РЭК) ПАМИР, доля ( $p + \text{He}$ )-компоненты ПКИ составляет  $\sim 40\%$ . Характеристики событий от ШАЛ, образованных протонами и полученных в эксперименте Тянь-Шанской высокогорной научной станции (ТШВНС), изучены в сравнении с экспериментальными данными KASCADE-Grande. По изучению зависимости возраста ШАЛ и  $N_\mu$  от  $N_e$  из данных ШАЛ ТШВНС (ШАЛ + РЭК ТШВНС) сделан вывод об утяжелении массового состава ПКИ в диапазоне  $E_0 = 1\text{--}100$  ПэВ.

DOI: 10.31857/S0044002720010110

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Массовый состав первичного космического излучения (ПКИ) остается предметом научных дискуссий. Доля протонов в массовом составе ПКИ при  $E_0 = 1\text{--}100$  ПэВ оценивается от 5% до 20%, доля  $p + \text{He}$  до 70%, в зависимости от эксперимента и модели прохождения широких атмосферных ливней (ШАЛ) через атмосферу [1, 2]. Для оценки массового состава ПКИ определяются и изучаются параметры ШАЛ, подверженные минимальным флуктуациям при развитии ядерно-электромагнитного каскада в атмосфере. Данные параметры характеризуют события в стволах ШАЛ.

Регистрация событий вблизи оси ШАЛ на расстояниях  $\sim$ десятка сантиметров выполняется с применением резистивных плоских счетчиков (РПС) (эксперимент Argo YBJ [3]) и РЭК (эксперименты ПАМИР [4], ТШВНС [5], ЯБК [6]). Применение РПС для локализации оси ШАЛ позволило достичь модельной точности  $\sim 10$  см при невозможности изучения структуры ствола ШАЛ на данных расстояниях. РЭК — единственный метод, позволяющий изучать структуру событий в стволе ШАЛ с разрешением  $\sim 30$  мкм. Основное

количество событий, регистрируемых в РЭК, образовано  $p + \text{He}$  ( $>96\%$ ). Характеристики семейств  $\gamma$ -квантов и, в частности, гало, природа которого объяснена в [1, 2, 7], максимально чувствительны к массовому составу ПКИ в силу локализации  $\gamma$ -квантов вблизи оси ШАЛ.

Ранее предполагалось, что массовый состав ПКИ при  $E_0 \sim 3$  ПэВ легкий, с преобладающей долей  $p + \text{He}$  [8]. В настоящее время по данным ряда экспериментов массовый состав ПКИ утяжеляется, начиная с  $E_0 \sim 1$  ПэВ. На рис. 1 показан спектр ПКИ по  $E_0$  в области излома по данным EAS-TOP, Tibet III, Ice Top, Tunka, Akeno, KASCADE, KASCADE-Grande, BLANCA, GAMMA, HiRes II, ARGO-YBJ, DICE, CASA-MIA. Результаты гибридных экспериментов EAS-TOP и MACRO [12, 13], эксперименты Tibet AS $\gamma$ , BASJE [14, 15], CASA-MIA Collaboration [16] показали уменьшение доли легких ядер  $p + \text{He}$  в массовом составе ПКИ в области излома энергетического спектра ПКИ при  $E_0 \sim 3$  ПэВ. Согласно данным экспериментов KASCADE, KASCADE-Grande [17] доля протонов в диапазоне  $E_0 = 1\text{--}100$  ПэВ не превышает 10%. Результаты эксперимента ARGO-YBJ показали, что доля  $p + \text{He}$  начинает уменьшаться при  $E_0 \sim 1$  ПэВ, и массовый состав ПКИ утяжеляется [9]. Из рис. 1 следует, что оценки доли легких ядер и изменение доли легких ядер в

\*E-mail: sep@lebedev.ru; vgsep@ya.ru

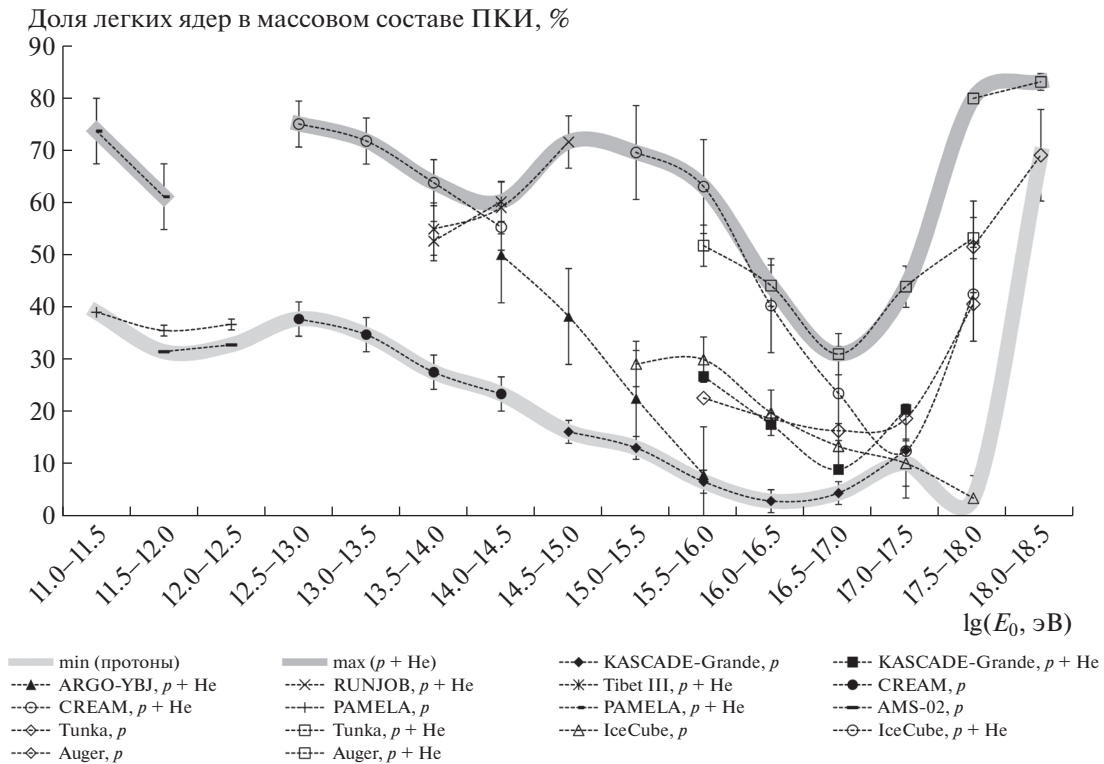


Рис. 1. Доля протонов и  $p + He$  в массовом составе ПКИ по данным основных экспериментов [9–11].

массовом составе ПКИ с  $E_0$  существенно различаются. Наибольшее расхождение данных экспериментов в оценке доли  $p + He$  наблюдается при  $E_0 \sim 10$  ПэВ. Согласно данным ARGO-YBJ, доля  $p + He$  составляет  $\sim 10\%$ , IceCube  $\sim 60\%$ . Разница 50% говорит о необходимости более надежной и, по возможности, модельно слабо зависимой оценки доли  $p + He$  в массовом составе ПКИ при  $E_0 = 10$  ПэВ.

В работах коллабораций KASCADE-Grande [18], Tunka [19, 20], Tunka-Rex [21, 22], в других исследованиях, включающих использование данных LHCf [21, 22], обсуждаются два основных аспекта, относящихся к оценке доли легких ядер в массовом составе ПКИ. Первый аспект состоит в оценке доли протонов и ядер He в массовом составе ПКИ, второй — утяжеляется либо становится более легким массовый состав ПКИ в области излома энергетического спектра ПКИ.

В экспериментах с РЭК, позволяющих оценить долю  $p + He$  на основе анализа событий вблизи оси ШАЛ [1], применен метод гало. Согласно последнему, доля  $p + He$  остается существенной при  $E_0 = 10$  ПэВ. На рис. 2 приведено изменение доли протонов и  $p + He$  в массовом составе ПКИ в диапазоне  $E_0 = 1–100$  ПэВ по данным экспериментов РЭК ПАМИР, KASCADE [8, 11, 18, 24], ARGO-YBJ [9], Tunka [21, 25–28] и IceCube [29]. Из рис. 2 следует, что результаты эксперимента РЭК

ПАМИР по оценке доли протонов и доли ядер He в массовом составе ПКИ при  $E_0 = 10$  ПэВ на основе анализа гало показали хорошее согласие с результатами экспериментов Tunka и IceCube. Расхождения в доле протонов и  $p + He$  по данным РЭК ПАМИР, Tunka и IceCube с данными KASCADE и ARGO-YBJ составляет 15–20%, что связано с применяемыми при оценках массового состава методами получения и интерпретациями характеристик событий в ШАЛ. В методе гало рассматриваются характеристики событий в  $\sim$ несколько см от оси ШАЛ, в методе ШАЛ — характеристики событий с более высокими флуктуациями вдали от ствола ШАЛ.

Основные эксперименты с РЭК, проводившиеся с 1970-х гг., — ПАМИР [1, 4] (Таджикистан, 4300 м н.у.м.), ТШВНС [30, 31] (Казахстан, 3400 м н.у.м.), ЯБК [32, 33] (Канбала, Тибет, 5400 м н.у.м., Чакалтая, Боливия, 5280 м н.у.м., Фуджи, Япония, 3700 м н.у.м.), эксперименты на аэростатах JACEE, RUNJOB. Статистически значимое количество событий (1294 семейства  $\gamma$ -квантов и 61 гало) получено только в эксперименте РЭК ПАМИР. В эксперименте РЭК ТШВНС выполнено сопоставление БД РЭК с БД ШАЛ ТШВНС [34], что позволило оценить изменение массового состава ПКИ.

События, регистрируемые в экспериментах с РЭК, — электромагнитные каскады, связанные

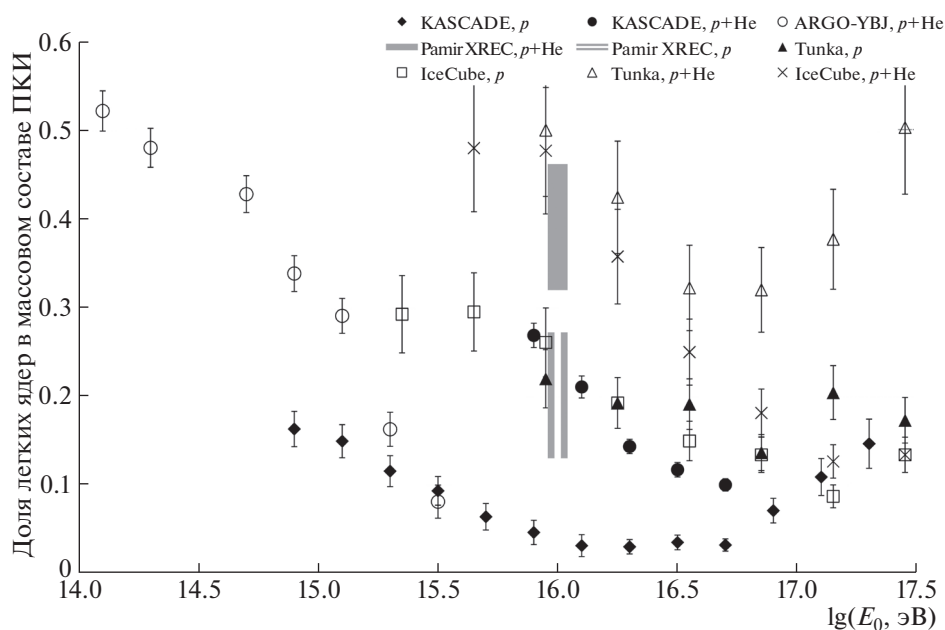


Рис. 2. Доля протонов и  $p + \text{He}$  в массовом составе ПККИ по данным экспериментов KASCADE [8, 11, 18, 24], ARGO-YBJ [9], Tunka [21, 25–28], IceCube [29], РЭК ПАМИР.

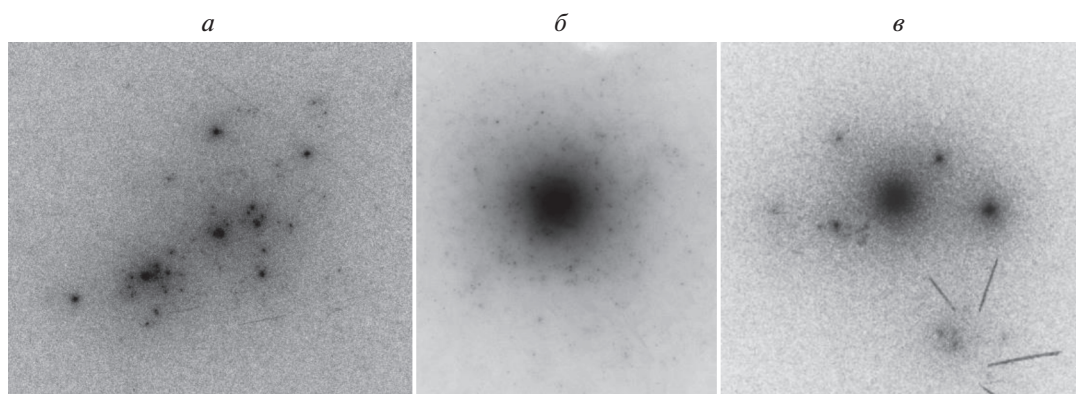


Рис. 3. Семейство  $\gamma$ -квантов (а), одноцентровое гало “Таджикистан” (б), многоцентровое гало (в).

с ШАЛ, наблюдаемые на рентгенографической пленке (РГП) в виде пятен потемнений. Пятна потемнений на РГП разделены на группы:

Отдельные  $\gamma$ -кванты. Близко расположенные друг к другу 1–3 области потемнений на РГП с площадями  $< 1 \text{ мм}^2$ .

Семейства  $\gamma$ -квантов (рис. 3а). Множественные ( $\sim$ десятки) локально расположенные области потемнений на РГП с площадями  $< 1 \text{ мм}^2$ .

Одноцентровые гало (рис. 3б), или семейства  $\gamma$ -квантов с гало. Диффузная область потемнения на РГП с площадью согласно критерия гало [2]. Кроме диффузной области потемнения, на изображении гало наблюдаются отдельные  $\gamma$ -кванты (семейства  $\gamma$ -квантов).

Многоцентровые гало (рис. 3в). Диффузные области потемнения на РГП с суммой площадей согласно критерия многоцентрового гало [2]. Кроме диффузных областей потемнения, на изображении гало наблюдаются  $\gamma$ -кванты (семейства  $\gamma$ -квантов).

При  $E_0 \geq 0.1 \text{ ПэВ}$ , на которые рассчитаны ливневые установки, оценки  $E_0$  и массового состава ПККИ зависят от особенностей реконструкции ШАЛ в атмосфере. В то же время эксперименты с РЭК, размещенными в глубине атмосферы, регистрируют события, образованные преимущественно протонами. Чем больше глубина атмосферы, тем выше  $E_0$  и легче ядра ПККИ, образовавшие ШАЛ, регистрируемые в РЭК как семейства  $\gamma$ -квантов. РЭК, размещенная в глубине атмосферы, в части

**Таблица 1.** Вероятности образования семейств  $\gamma$ -квантов ядрами ПКИ (модель MC0-FANSY [35], критерии реконструкции ШАЛ соответствуют РЭК ПАМИР,  $E_0 \geq 5$  ПэВ (порог образования гало))

$W_p, \%$				$W_{\text{He}}, \%$				$W_{>\text{He}}, \%$			
$W_p^{(100)}$	$W_p^{(400)}$	Гало	$W_p^f$	$W_{\text{He}}^{(100)}$	$W_{\text{He}}^{(400)}$	Гало	$W_{\text{He}}^f$	$W_{>\text{He}}^{(100)}$	$W_{>\text{He}}^{(400)}$	Гало	$W_{>\text{He}}^f$
9.244	2.317	1.756	0.727	3.282	0.712	0.442	0.178	2.237	0.280	0.125	0.074

оценки массового состава ПКИ, — единственный модельно слабо зависимый эксперимент при  $E_0 \geq 0.1$  ПэВ, позволяющий анализировать события в ШАЛ, образованных протонами и ядрами He. Ограничение по  $E_0$  в эксперименте с РЭК определяется критерием отбора семейств  $\gamma$ -квантов с  $\Sigma E_\gamma \geq 0.1$  ПэВ.

## 2. ОЦЕНКА ДОЛИ $p + \text{He}$ В МАССОВОМ СОСТАВЕ ПКИ

Обозначим интенсивность ПКИ в точке генерации ШАЛ как  $I_0 = I_p + I_{\text{He}} + I_{>\text{He}}$ , где  $I_p$ ,  $I_{\text{He}}$ ,  $I_{>\text{He}}$  — интенсивность первичных протонов, ядер He и  $>\text{He}$  соответственно.  $\tilde{N}_p$ ,  $\tilde{N}_{\text{He}}$ ,  $\tilde{N}_{>\text{He}}$  — количество семейств  $\gamma$ -квантов, наблюдаемых на РГП, если все ядра ПКИ — протоны, He и  $>\text{He}$  соответственно.  $W_p$ ,  $W_{\text{He}}$ ,  $W_{>\text{He}}$  — вероятности образования семейств  $\gamma$ -квантов протонами, ядрами He и ядрами  $>\text{He}$  соответственно. Тогда  $I_0 = \tilde{N}_p/W_p = \tilde{N}_{\text{He}}/W_{\text{He}} = \tilde{N}_{>\text{He}}/W_{>\text{He}}$ .

Количество экспериментально полученных семейств  $\gamma$ -квантов  $N_0 = N_p + N_{\text{He}} + N_{>\text{He}}$ , где  $N_p$ ,  $N_{\text{He}}$ ,  $N_{>\text{He}}$  — количество семейств  $\gamma$ -квантов, образованных протонами, ядрами He и  $>\text{He}$  соответственно.

Обозначим  $P_p$ ,  $P_{\text{He}}$ ,  $P_{>\text{He}}$  — доля протонов, ядер He и  $>\text{He}$  в массовом составе ПКИ соответственно. Тогда  $N_p = I_0 P_p W_p$ ,  $N_{\text{He}} = I_0 P_{\text{He}} W_{\text{He}}$ ,  $N_{>\text{He}} = I_0 P_{>\text{He}} W_{>\text{He}}$ .

Учитывая, что  $P_p + P_{\text{He}} + P_{>\text{He}} = 1$ :

$$P_p = \left\{ \frac{N_0 W_p}{\tilde{N}_p} - W_{\text{He}}(1 - P_{>\text{He}}) - W_{>\text{He}} P_{>\text{He}} \right\} (W_p - W_{\text{He}})^{-1}, \quad (1)$$

$$P_{\text{He}} = \left\{ \frac{N_0 W_p}{\tilde{N}_p} - W_p(1 - P_{>\text{He}}) - W_{>\text{He}} P_{>\text{He}} \right\} (W_{\text{He}} - W_p)^{-1}. \quad (2)$$

Из формул (1) и (2) следует зависимость  $P_p$  и  $P_{\text{He}}$  от  $W_p$ ,  $W_{\text{He}}$ ,  $W_{>\text{He}}$  и  $N_0/\tilde{N}_p$ . Вероятности образования гало ядрами ПКИ приведены в табл. 1. Из табл. 1 следует, что  $W_p$ ,  $W_{\text{He}}$  и  $W_{>\text{He}}$  гало различаются в 4 и более раз, что позволяет оценить  $P_p$ ,  $P_{\text{He}}$  и  $P_{>\text{He}}$ . В табл. 1:  $W_p^{(100)}$ ,  $W_{p,\text{He},>\text{He}}^{(400)}$ ,  $W_{p,\text{He},>\text{He}}^f$  — вероятности образования 100-, 400-ТэВ-х семейств  $\gamma$ -квантов и структурных гало соответственно относительно  $I_{p,\text{He},>\text{He}}$ .

Из табл. 1 следуют расчетные отношения  $W_p^{(400)}:W_{\text{He}}^{(400)}:W_{>\text{He}}^{(400)} \cong 3:3:1$ ,  $W_p:W_{\text{He}}:W_{>\text{He}} \cong 4:4:1$ ,  $W_p^f:W_{\text{He}}^f:W_{>\text{He}}^f \cong 4:2:1$  и  $W_p^{(400)}:W_{>\text{He}}^{(400)} \cong 8:1$ ,  $W_p:W_{>\text{He}} \cong 14:1$ ,  $W_p^f:W_{>\text{He}}^f \cong 10:1$ . При  $E_0 = 5-10$  ПэВ  $W_p^{(100)} \cong 5.05\%$ ,  $W_{\text{He}}^{(100)} \cong 0.79\%$ ,  $W_{>\text{He}}^{(100)} \cong 0.05\%$  ( $>96\%$  всех семейств  $\gamma$ -квантов с  $\Sigma E_\gamma \geq 0.1$  ПэВ образованы протонами и ядрами He).

На рис. 4 показаны вероятности образования гало протонами, ядрами He и  $>\text{He}$  в зависимости от  $E_0$ . Из рис. 4 следует, что до  $\lg E_0 = 16.7$  практически все гало образованы протонами и ядрами He. Образование гало ядрами  $>\text{He}$  начинается с  $E_0 > 100$  ПэВ [7].

Для оценки зависимости метода гало от модельных переменных  $W_p$ ,  $W_{\text{He}}$ ,  $W_{>\text{He}}$  и  $\tilde{N}_p$  в части оценки  $P_p$  и  $P_{\text{He}}$  примем  $W_p = nW_{\text{He}}$ ,  $W_{\text{He}} = mW_{>\text{He}}$ ,  $w = N_0/\tilde{N}_p$ :

$$P_p = \frac{wn - 1}{n - 1} + \frac{(m - 1) P_{>\text{He}}}{(n - 1) m}, \quad (3)$$

$$P_{\text{He}} = \frac{n}{1 - n} (w - 1) - \frac{(1 - mn) P_{>\text{He}}}{(1 - n) m}. \quad (4)$$

При  $m = n = 1$  модель реконструкции ШАЛ нечувствительна к типу первичного ядра ПКИ и не применяется для описания экспериментальных данных РЭК ПАМИР. С ростом  $m$  и  $n$  характеристики гало (например, статистика гало), образованных различными ядрами, начинают существенно отличаться друг от друга. Расчеты показали, что при замене всех ядер ПКИ протонами количество гало составит 140, ядрами He — 35,  $>\text{He}$  —

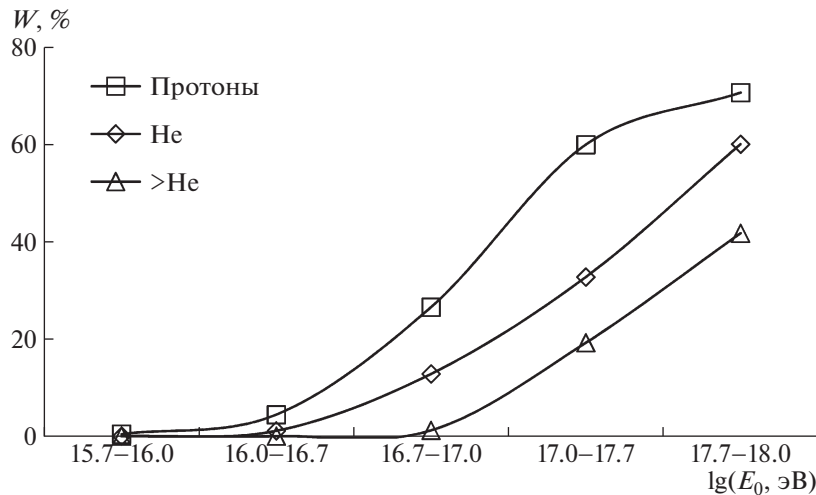


Рис. 4. Вероятность образования гало протонами, ядрами He и >He в зависимости от  $E_0$ .

5–10 гало. Граничные значения  $N_0 \pm \sqrt{N_0} = 53$ –69,  $\tilde{N}_p \pm \sqrt{\tilde{N}_p} = 128$ –152 и  $n = m = 2$  определяют предельно возможные  $P_p$ ,  $P_{\text{He}}$  и  $P_{>\text{He}}$ . Условие  $n = m \geq 2$  (существенная разница между вероятностями образования гало) полагает, что модель реконструкции ШАЛ существенно чувствительна к типу первичного ядра. В частности, расчетное соотношение  $W_{p,\text{He},>\text{He}}^{(100)}$  (табл. 1, РЭК ПАМИР) расположено на минимально возможной границе применения метода гало.

Особенность РЭК ПАМИР — преимущественная регистрация семейств  $\gamma$ -квантов, образованных протонами и, в меньшей степени, ядрами He (>96%). При  $m, n \gg 1$  из формул (3), (4) следует, что  $P_{p,\text{He}}(n)/P_{p,\text{He}}(n+1) \rightarrow 1$ ,  $P_{p,\text{He}}(m)/P_{p,\text{He}}(m+1) \rightarrow 1$ . В частности, при  $n = m \geq 3.5$ ,  $P_{p,\text{He}}(n)/P_{p,\text{He}}(n+1)$ ,  $P_{p,\text{He}}(m)/P_{p,\text{He}}(m+1)$  находятся в диапазоне (0.9; 1.1), и при больших  $n$  и  $m$  метод гало становится модельно слабо зависимым.

Из формул (1), (2), с учетом значений табл. 1 для гало,  $P_{>\text{He}} \leq 61\%$ . При  $P_{>\text{He}} > 61\%$  в РЭК ПАМИР не будет наблюдаемой статистики гало. С учетом  $N_0 \pm \sqrt{N_0}$  наблюдаемая статистика гало (61 при экспозиции  $ST \cong 3000 \text{ м}^2 \text{ год ср}$ ) требует минимум  $(39 \pm 6)\%$  доли  $(p + \text{He})$ -компоненты ПКИ и максимум  $(61 \pm 6)\%$  доли ядер >He. Из 39% минимальная доля протонов 20% и ядер He 19%, большая доля ядер He не обеспечит экспериментальную статистику гало. Из формул (1), (2) следует, что каждое зарегистрированное в эксперименте гало увеличивает минимальную долю  $p + \text{He}$  на  $\sim 0.8\%$ .

Метод гало оценки массового состава ПКИ характеризуется:

высокой статистикой гало, в отличие от, например, статистики многоцентровых гало (в РЭК ПАМИР зарегистрировано 61 гало, в т.ч. 14 многоцентровых гало);

надежностью визуальной регистрации гало, в отличие от, например, 400-ТэВ-х семейств  $\gamma$ -квантов, статистика которых зависит также от метода измерения  $E_\gamma$ ;

регистрацией в РЭК гало, образованных преимущественно протонами и ядрами He;

существенно различными вероятностями образования экспериментальных событий, образованных протонами, ядрами He и >He, по которым оценивается массовый состав ПКИ.

РЭК ПАМИР работает как сепаратор ШАЛ, образованных протонами и ядрами He. Зная статистику гало и учитывая, что гало в РЭК образованы преимущественно протонами и ядрами He, оценены минимальные доли протонов и ядер He в массовом составе ПКИ, обеспечивающие визуально наблюдаемую статистику событий с гало.

### 3. ОЦЕНКА ДОЛИ $p + \text{He}$ ПО МНОГОЦЕНТРОВЫМ ГАЛО

Характеристики гало, чувствительные к массовому составу ПКИ, — статистика гало, вероятности образования гало протонами, ядрами He и >He, различающиеся в несколько раз (табл. 1), и доля многоцентровых гало.

Обозначим:  $N_s$  — количество экспериментальных многоцентровых гало,  $S_0$  — экспериментальная доля многоцентровых гало,  $N_s = N_0 S_0$  ( $N_0 = 61 \pm \sqrt{61}$ ,  $N_s = 14 \pm \sqrt{14}$ ). В табл. 2 приведены  $S_0$  от протонов, ядер He, >He и экспериментальная  $S_0$  РЭК ПАМИР [36].

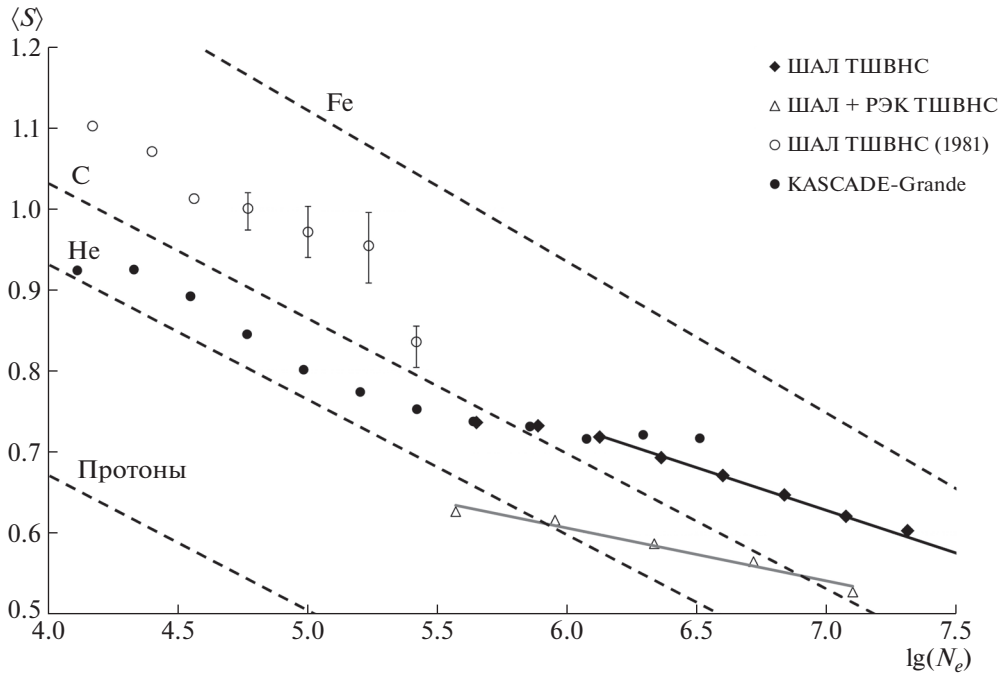


Рис. 5. Зависимость  $S$  от  $N_e$ . ШАЛ, образованные протонами, ядрами He, C, Fe показаны штриховыми линиями в сравнении с данными ШАЛ ТШВНС (в т.ч. ШАЛ ТШВНС 1981 [30]), ШАЛ + РЭК ТШВНС и KASCADE-Grande.

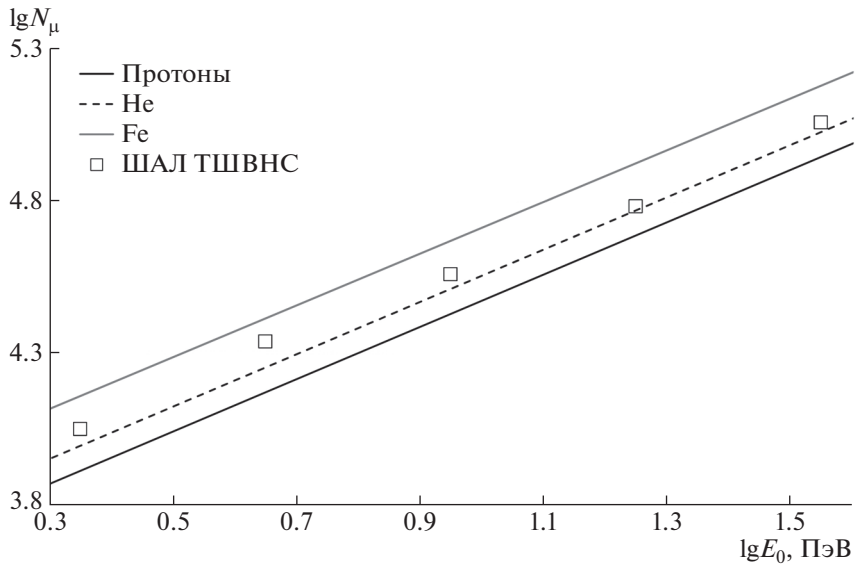


Рис. 6. Зависимости  $N_\mu^{p,Fe}$  (MC0-FANSY для ШАЛ ТШВНС) в сравнении с экспериментальными данными ШАЛ ТШВНС.

Формулы (1), (2) применительно к многоцентровым гало:

$$P_p = \left\{ \frac{N_0 W_p}{\tilde{N}_p} S_0 - W_{He} S_{He} (1 - P_{>He}) - W_{>He} P_{>He} S_{>He} \right\} (W_p S_p - W_{He} S_{He})^{-1}, \quad (5)$$

$$P_{He} = \left\{ \frac{N_0 W_p}{\tilde{N}_p} S_0 - W_p S_p (1 - P_{>He}) - W_{>He} P_{>He} S_{>He} \right\} (W_{He} S_{He} - W_p S_p)^{-1}. \quad (6)$$

Зависимости (5), (6), с учетом значений табл. 2 для многоцентровых гало,  $S_0 = 0.16-0.3$ , определяют  $P_{>He} \leq 57\%$ ,  $p + He \geq 43\%$ .

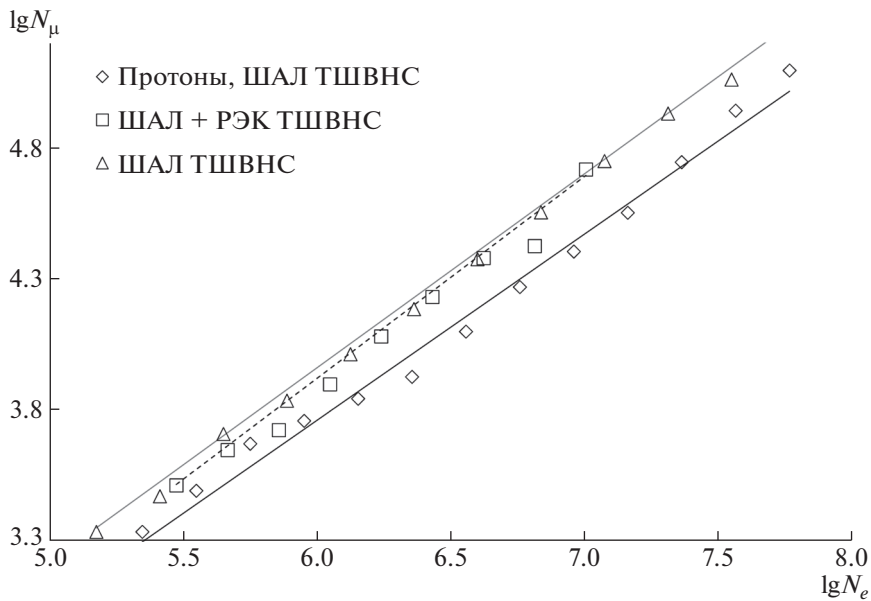


Рис. 7. Зависимость  $N_\mu$  от  $N_e$  (БД ШАЛ ТШВНС). Кривые: сплошная черная — протоны, штриховая — ШАЛ + РЭК ТШВНС, сплошная серая — ШАЛ ТШВНС.

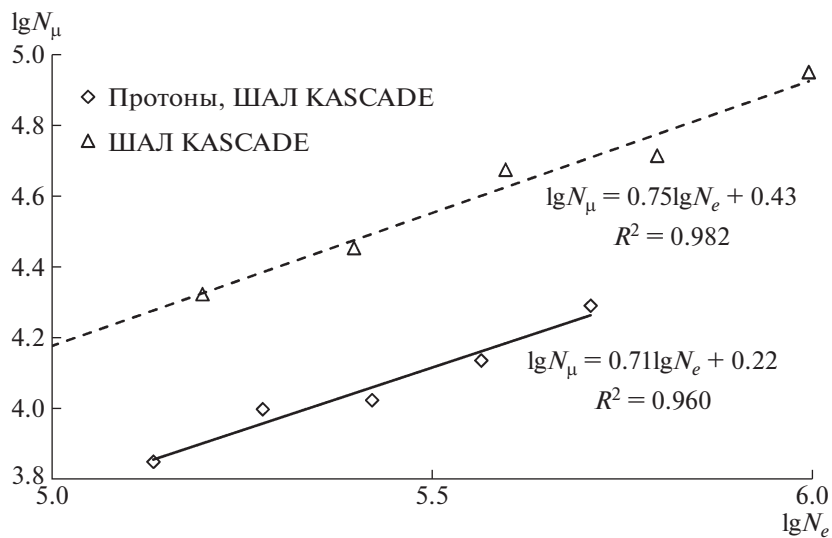


Рис. 8. Зависимость  $N_\mu$  от  $N_e$  в ШАЛ KASCADE-Grande. Кривые: сплошная черная — протоны, штриховая — ШАЛ KASCADE.

#### 4. ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ МАССОВОГО СОСТАВА ПКИ ПО ДАННЫМ ТШВНС

Характеристики ШАЛ, по которым оценено изменение массового состава ПКИ с  $E_0$  — количество мюонов  $N_\mu$  и возраст ШАЛ  $S$ .  $N_\mu$  увеличивается с ростом  $N_e$  и  $A$ ;  $S$  увеличивается с ростом  $A$  и снижается с ростом  $N_e$ . По данным ШАЛ ТШВНС  $N_\mu$  и  $S$  проанализированы в [1, 34], и в сравнении с данными KASCADE-Grande (1 млн событий из БД KASCADE [37]) в [1, 2].

На рис. 5 приведена зависимость  $\langle S \rangle (N_e, A)$  для ШАЛ ТШВНС и KASCADE-Grande в сравнении

с расчетными по MC0-FANSY зависимостями для протонов, ядер He, C, Fe. С ростом  $N_e$  события, регистрируемые на РГП, относятся к ШАЛ, ини-

Таблица 2. Доля многоцентровых гало, образованных протонами, He, C, Fe и экспериментальная для РЭК ПАМИР

$S_{0p}$	$S_{0\text{He}}$	$S_{0\text{C}}$	$S_{0\text{Fe}}$	$S_{0\text{ПАМИР}}$
0.25	0.45	0.59	0.70	$0.23 \pm 0.07$



Таблица 3. Изменение  $\langle A \rangle$  с  $N_e$ 

$\lg N_e$	4.5–5.0	5.0–5.5	5.5–6.0	6.0–6.5	6.5–7.0	7.0–7.5	4.5–7.5
$\Delta \lg A$	–0.018	0.157	0.195	0.139	0.034	0.165	0.672

цированными более тяжелыми ядрами. По данным рис. 5  $\partial \langle S \rangle / \partial \lg N_e = -0.167$ ,  $\partial \langle S \rangle / \partial \lg A = 0.397$ . В диапазоне  $\lg N_e = 6.0-6.5$   $\Delta \langle S \rangle \cong 0$  — снижение  $\langle S \rangle$  с ростом  $N_e$  уравновешено увеличением  $\langle S \rangle$  с ростом  $A$ . При  $\lg N_e = 6.0$   $\langle A \rangle$  не должно превышать 35 (группа Si, MC0-FANSY [35]). В диапазоне  $\lg N_e = 4.5-5.0$   $\Delta \lg A \cong 0$  ( $\langle A \rangle$  не меняется). Из рис. 5 следуют значения роста  $\langle A \rangle$ , приведенные в табл. 3. При  $E_0 = 1-100$  ПэВ:

массовый состав ПКИ остается смешанным, с  $\langle S \rangle$ , соответствующим ядрам He для ШАЛ + РЭК ТШВНС и ядрам группы CNO для ШАЛ ТШВНС и KASCADE-Grande,

массовый состав ПКИ становится более тяжелым с ростом  $N_e$  [1, 2],

в области излома спектра ПКИ по  $E_0$   $\langle S \rangle$  не меняется и равен 0.70–0.75 для ШАЛ ТШВНС, и снижение  $S$  с ростом  $N_e$  уравновешено ростом  $S$  с ростом  $A$ .

Зависимость  $N_\mu$  от  $E_0$  (MC0-FANSY для ШАЛ ТШВНС) для протонов и ядер Fe:

$$\begin{aligned} \lg N_\mu^p &= (0.86 \pm 0.01) \lg(E_0 [\text{ПэВ}]) + (3.61 \pm 0.01), \quad R_a^2 = 0.999, \\ \lg N_\mu^{\text{Fe}} &= (0.85 \pm 0.01) \lg(E_0 [\text{ПэВ}]) + (3.86 \pm 0.01), \quad R_a^2 = 0.999. \end{aligned} \quad (7)$$

На рис. 6 приведены расчетные зависимости  $N_\mu^{p,\text{Fe}}$  (7) в сравнении с экспериментальными данными ШАЛ ТШВНС.  $N_\mu$  растет с ростом  $A$  как  $N_\mu \sim A^\alpha$ . Учитывая (7),  $\alpha = 0.14$ , что соответствует эффективной множественности рождения  $\pi^{0,\pm}$ ,  $N = 19$  (MC0-FANSY). Разнице  $\Delta \lg N_\mu = 0.12-0.13$  Б соответствует  $\langle A \rangle = 8-9$  для  $E_0 = 10$  ПэВ. Изменение  $\langle A \rangle$  с  $E_0$  (по рис. 6) приведено в табл. 4. Анализ данных ШАЛ ТШВНС по распределению  $N_\mu/E_0$  показывает, что массовый состав ПКИ при  $E_0 = 10$  ПэВ остается смешанным со средними ядрами не тяжелее группы CNO.

Таблица 4. Зависимость  $\langle A \rangle$  от  $E_0$ 

$E_0$ , ПэВ	2	4	9	18	35
$\langle A \rangle$	$10 \pm 2$	$17 \pm 4$	$9 \pm 2$	$5 \pm 1$	$7 \pm 1$

На рис. 7 приведены экспериментальные зависимости  $N_\mu(N_e)$  для БД ШАЛ ТШВНС, ШАЛ + РЭК ТШВНС (банк данных сопоставленных событий) и зависимость  $N_\mu(N_e)$  для протонов, полученная из экспериментальной БД ШАЛ ТШВНС.

Из рис. 7 следует:

$$\begin{aligned} \lg N_\mu^p &= (0.71 \pm 0.02) \lg N_e - (0.5 \pm 0.1), \quad R_a^2 = 0.989, \\ \lg N_\mu^{\text{ШАЛ+РЭК}} &= (0.77 \pm 0.03) \lg N_e - (0.7 \pm 0.2), \quad R_a^2 = 0.984, \\ \lg N_\mu^{\text{ШАЛ}} &= (0.74 \pm 0.01) \lg N_e - (0.48 \pm 0.06), \quad R_a^2 = 0.998. \end{aligned} \quad (8)$$

Из зависимостей (8) следует:

$N_\mu^{\text{ШАЛ+РЭК}} > N_\mu^{\text{ШАЛ}}$  при  $\lg N_e > 7$ , что, с учетом преимущественной регистрации протонов и ядер He в РЭК, рассмотрено в [34],

$N_\mu^{\text{ШАЛ}}$  растет с  $N_e$  быстрее, нежели  $N_\mu^p$ , что указывает на утяжеление массового состава ПКИ при  $E_0 = 1-100$  ПэВ.

На рис. 8 приведены экспериментальные зависимости  $N_\mu(N_e)$  (БД ШАЛ KASCADE-Grande) и  $N_\mu(N_e)$  для протонов, полученные из экспериментальной БД ШАЛ KASCADE-Grande. Из рис. 8 следует, что  $N_\mu^{\text{ШАЛ}}$  растет с  $N_e$  быстрее, нежели  $N_\mu^p$ , что указывает на утяжеление массового состава ПКИ.

## 5. ВЫВОДЫ

Применение метода гало к БД РЭК ПАМИР показало, что минимальная доля  $p + \text{He}$  в массовом составе ПКИ, обеспечивающая наблюдаемую статистику семейств  $\gamma$ -квантов с гало, составляет  $(39 \pm 6)\%$  при  $E_0 = 10$  ПэВ. По экспериментальным данным ШАЛ ТШВНС и KASCADE-Grande в диапазоне  $E_0 = 1-100$  ПэВ массовый состав ПКИ утяжеляется.

1. Полученная оценка доли  $p + \text{He}$  в массовом составе ПКИ минимальна. Учет дополнительных условий, например, изменения соотношения  $P_p$ ,  $P_{\text{He}}$  и  $P_{>\text{He}}$  с  $E_0$ , увеличит долю  $p + \text{He}$ .

2. В методе гало использованы события, регистрируемые вблизи оси ШАЛ и несущие информацию о первичном акте взаимодействия ядер ПКИ с ядрами воздуха.



3. Вероятности образования гало протонами и ядрами He различаются в несколько раз, что делает метод гало модельно слабо зависимым. РЭК ПАМИР рассматривается как сепаратор протонов и, в меньшей степени, ядер He.

4. Порог образования гало существенно выше  $E_0 = 0.1$  ПэВ, что относит метод гало к диапазону по  $E_0$ , где большинство методов оценки массового состава ПКИ непрямые и модельно зависимые.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- R. A. Mukhamedshin, V. S. Puchkov, S. E. Ryatovsky, and S. B. Shaulov, *Astropart. Phys.* **102**, 32 (2018), <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2018.05.005>
- Р. А. Мухамедшин, В. С. Пучков, С. Е. Пятковский, С. Б. Шаулов, *Краткие сообщения по физике* **12**, 64 (2017) [*Bull. Lebedev Phys. Institute* **44**, 380 (2017)], <https://doi.org/10.3103/S1068335617120090>
- L. Saggese, T. Di Girolamo, M. Iacovacci, and S. Mastroianni, *Nucl. Instrum. Methods A* **533**, 55 (2004), <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.06.129>
- Взаимодействие адронов космических лучей сверхвысоких энергий*, Труды ФИАН **154** (1984).
- A. P. Chubenko, A. L. Shepetov, V. P. Antonova, R. U. Beisembayev, A. S. Borisov, O. D. Dalkarov, O. N. Kryakunova, K. M. Mukashev, R. A. Mukhamedshin, R. A. Nam, N. F. Nikolaevsky, V. P. Pavlyuchenko, V. V. Piscal, V. S. Puchkov, V. A. Ryabov, T. Kh. Sadykov, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods A* **832**, 158 (2016), <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.068>
- E. H. Shibuya, *Rapporteur talks of 20th International Cosmic Ray Conference, HE (High Energy Phenomena) Session, 1987, Tokyo*.
- В. С. Пучков, С. Е. Пятковский, *ЯФ* **81**, 212 (2018) [*Phys. At. Nucl.* **81**, 222 (2018)], <https://doi.org/10.1134/S1063778818020151>
- KASCADE Collab. (W. D. Apel *et al.*), *Astropart. Phys.* **31**, 86 (2009), <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2008.11.008>
- I. De Mitri (on behalf of the ARGO-YBJ Collab.), in *Proceedings of the XVIII International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions (ISVHECRI 2014)*, EPJ Web Conf. **99**, 08003 (2015), <https://doi.org/10.1051/epjconf/20159908003>
- H. P. Dembinski, R. Engel, A. Fedynitch, Th. Gaisser, F. Riehn, and T. Stanev, in *Proceedings of the 35th International Cosmic Ray Conference, 2017*, PoS(ICRC2017) 533.
- W. D. Apel, J. C. Arteaga-Velazquez, K. Bekk, M. Bertaina, J. Blumer, H. Bozdog, I. M. Brancus, E. Cantoni, A. Chiavassa, F. Cossavella, K. Daumiller, V. deSouza, F. Di Pierro, P. Doll, R. Engel, J. Engler, *et al.*, *Astropart. Phys.* **47**, 54 (2013), <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2013.06.004>
- EAS-TOP and MACRO Collab. (M. Aglietta *et al.*), *Astropart. Phys.* **21**, 223 (2004), <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2004.01.005>
- M. Ambrosio *et al.* (MACRO Collab.), *Phys. Rev. D* **56**, 1418 (1997), <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.56.1418>
- Tibet AS $\gamma$  Collab. (M. Amenomori *et al.*), *Phys. Lett. B* **632**, 58 (2006), <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2005.10.048>
- H. Tokuno, F. Kakimoto, S. Ogio, D. Harada, Y. Kurashina, Y. Tsunesada, N. Tajima, Y. Matsu- bara, A. Morizawa, O. Burgoa, E. Gotoh, K. Kadota, T. Kaneko, M. Kubo, P. Miranda, T. Mizobuchi, *et al.*, *Astropart. Phys.* **29**, 453 (2008), <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2008.05.001>
- M. A. K. Glasmacher, M. A. Catanese, M. C. Chantell, C. E. Covault, J. W. Cronin, B. E. Fick, L. F. Fortson, J. W. Fowler, K. D. Green, D. B. Kieda, J. Matthews, B. J. Newport, D. F. Nitz, R. A. Ong, S. Oser, D. Sinclair, and J. C. van der Velde, *Astropart. Phys.* **12**, 1 (1999), [https://doi.org/10.1016/S0927-6505\(99\)00076-6](https://doi.org/10.1016/S0927-6505(99)00076-6)
- W. D. Apel, J. C. Arteaga, A. F. Badea, K. Bekk, M. Bertaina, J. Blumer, H. Bozdog, I. M. Brancus, P. Buchholz, E. Cantoni, A. Chiavassa, F. Cossavella, K. Daumiller, V. de Souza, F. Di Pierro, P. Doll, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods A* **620**, 202 (2010), <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.03.147>
- S. Schoo *et al.* (KASCADE-Grande Collab.), in *Proceedings of the 35th International Cosmic Ray Conference, 2017*, PoS(ICRC2017) 339.
- L. Kuzmichev, I. Astapov, P. Bezyazeev, V. Boreyko, A. Borodin, M. Brückner, N. Budnev, A. Chiavassa, O. Gress, T. Gress, O. Grishin, A. Dyachok, S. Epimakhov, O. Fedorov, A. Gafarov, V. Grebenyuk, *et al.*, in *Proceedings of the XIX International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions (ISVHECRI 2016)*, EPJ Web Conf. **145**, 01001 (2017), <https://doi.org/10.1051/epjconf/201614501001>
- V. Ptuskin, in *Proceedings of the XIX International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions (ISVHECRI 2016)*, EPJ Web Conf. **145**, 03001 (2017), <https://doi.org/10.1051/epjconf/201614503001>
- O. Fedorov *et al.* (Tunka-Rex Collab.), in *Proceedings of the 35th International Cosmic Ray Conference, 2017*, PoS(ICRC2017) 387.
- D. Kostunin *et al.* (Tunka-Rex Collab.), in *Proceedings of the XIX International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions (ISVHECRI 2016)*, EPJ Web Conf. **145**, 11001 (2017), <https://doi.org/10.1051/epjconf/201614-511001>
- H. Menjo, O. Adriani, E. Berti, L. Bonechi, M. Bongi, G. Castellini, R. D'Alessandro, M. Haguenaer, Y. Itow, K. Kasahara, K. Masuda, Y. Matsubara, Y. Muraki, K. Oohashi, P. Papini, Sergio Ricciarini, *et al.*, in *Proceedings of the 35th International Cosmic Ray Conference, 2017*, PoS(ICRC2017) 1099.
- K.-H. Kampert and M. Unger, *Astropart. Phys.* **35**, 660 (2012), <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2012.02.004>

25. N. Budnev, I. Astapov, P. Bezyazeev, V. Boreyko, A. Borodin, M. Brueckner, A. Chiavassa, A. Dyachok, O. Fedorov, A. Gafarov, N. Gorbunov, V. Grebenyuk, O. Gress, T. Gress, O. Grishin, A. Grinyuk, *et al.*, in *Proceedings of the 35th International Cosmic Ray Conference, 2017*, PoS(ICRC2017) 768.
26. L. Svshnikova, I. Astapov, P. Bezyazeev, V. Boreyko, A. Borodin, M. Brueckner, N. Budnev, A. Chiavassa, A. Dyachok, O. Fedorov, A. Gafarov, N. Gorbunov, V. Grebenyuk, O. Gress, T. Gress, O. Grishin, *et al.*, in *Proceedings of the 35th International Cosmic Ray Conference, 2017*, PoS(ICRC2017) 777.
27. A. Porelli, R. Wischnewski, A. Garmash, I. Astapov, P. Bezyazeev, V. Boreyko, A. Borodin, M. Brueckner, N. Budnev, A. Chiavassa, A. Dyachok, O. Fedorov, A. Gafarov, E. Gorbovskoy, N. Gorbunov, V. Grebenyuk, *et al.*, in *Proceedings of the 35th International Cosmic Ray Conference, 2017*, PoS(ICRC2017) 754.
28. E. Postnikov, I. Astapov, P. Bezyazeev, V. Boreyko, A. Borodin, M. Brueckner, N. Budnev, A. Chiavassa, A. Dyachok, A. S. Elshoukrofy, O. Fedorov, A. Gafarov, A. Garmash, N. Gorbunov, V. Grebenyuk, O. Gress, *et al.*, in *Proceedings of the 35th International Cosmic Ray Conference, 2017*, PoS(ICRC2017) 756.
29. C. Kopper, in *Proceedings of the 35th International Cosmic Ray Conference, 2017*, PoS(ICRC2017) 981.
30. В. С. Асейкин, Н. Г. Вильданов, Н. В. Кабанова, И. Н. Киров, С. К. Мачавариани, В. А. Мариненко, Н. М. Нестерова, Н. М. Никольская, С. И. Никольский, В. А. Ромахин, Й. Н. Стаменов, Е. И. Тукиш, А. П. Чубенко, В. И. Яковлев, Препринт № 178, Физический институт им. П.Н. Лебедева (Москва, 1981), URL: <http://preprints.lebedev.ru>
31. Н. М. Нестерова, В. П. Павлюченко, С. К. Мачавариани, Е. Н. Гудкова, Препринт № 10, Физический институт им. П.Н. Лебедева (Москва, 2014), URL: <http://preprints.lebedev.ru>
32. Chacaltaya and Pamir Collab. (L. T. Baradzei *et al.*), Nucl. Phys. B **370**, 365 (1992).
33. A. Ohsawa, *Contribution from Chacaltaya Emulsion Chamber Experiment of Brasil–Japan Collaboration* (Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokio, 1983).
34. S. B. Shaulov, P. F. Beyl, R. U. Beysembaev, E. A. Beysembaeva, S. P. Bezshapov, A. S. Borisov, K. V. Cherdyntceva, M. M. Chernyavsky, A. P. Ghubenko, O. D. Dalkarov, V. G. Denisova, A. D. Erlykin, N. V. Kabanova, E. A. Kanevskaya, K. A. Kotelnikov, A. E. Morozov, *et al.*, in *Proceedings of the XIX International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions (ISVHECRI 2016)*, EPJ Web Conf. **145**, 17001 (2017), <https://doi.org/10.1051/epjconf/2017-14517001>
35. R. A. Mukhamedshin, Eur. Phys. J. C **60**, 345 (2009), <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-009-0945-y>
36. A. S. Borisov, V. M. Maximenko, V. S. Puchkov, S. E. Pyatovsky, S. A. Slavatskiy, A. V. Vargasov, and R. A. Mukhamedshin, ЭЧАЯ **36**, 1227 (2005) [Phys. Part. Nucl. **36**, 643 (2005)].
37. KASCADE-Grande Collab., URL: <https://kcdc.ikp.kit.edu/datashop/fulldata>

## ASSESSMENT OF $p + \text{He}$ FRACTION IN THE MASS COMPOSITION OF THE PRIMARY COSMIC RADIATION AT $E_0 = 1-100$ PeV ACCORDING TO GAMMA-RAY FAMILIES WITH HALO

V. S. Puchkov, S. E. Pyatovsky

*Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

The paper analyzes  $\gamma$ -ray families with halo (halo) characteristics which can be observed in the cores of extensive atmosphere showers (EAS). The events were obtained based on the X-ray emulsion chamber (XREC) in the Pamir experiment, and the events' characteristics were studied at distances up to  $\sim 10$  cm from the EAS core with a resolution of  $\sim 30$  microns. The study of the event parameters in the EAS cores using the halo method made it possible to analyze the mass composition of the primary cosmic radiation (PCR) at  $E_0 = 10$  PeV, and to draw conclusions about the fraction of light nuclei in the PCR, which are weakly dependent on the model of the EAS passage through the atmosphere. From the analysis of the halo and multicenter halo obtained in the XREC Pamir experiment, the fraction of the  $(p + \text{He})$ -component of the PCR is  $\sim 40\%$ . The events' characteristics as a result of EAS formed by protons and obtained in the experiment of the Tien-Shan high-mountain Scientific Station (TShSS) were studied in comparison with the KASCADE-Grande experimental data. As for study of the dependences of the EAS age and  $N_\mu$  on  $N_e$ , the conclusion was made that the PCR mass composition increased within the range  $E_0 = 1-100$  PeV based on the data of the EAS TShSS (EAS + XREC TShSS).