

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПРЕДСКАЗАНИЯ
КООРДИНАТ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ С ЭНЕРГИЕЙ
10–1000 ТЭВ/ЧАСТИЦУ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НОВОГО
МЕТОДА ПОИСКА И ПРОСЛЕЖИВАНИЯ ЧАСТИЦ
В ЯДЕРНО-ЭМУЛЬСИОННЫХ ПЛЕНКАХ.**

(ДАННЫЕ РОССИЙСКО-ЯПОНСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА RUNJOB)

И. С. Заярная, Т. А. Ирхина

В работе подробно рассматриваются экспериментальные и методические ошибки предсказания координат нуклонов и ядер первичного космического излучения в ядерных эмульсиях при использовании нового метода поиска и прослеживания треков частиц в эмульсионных пленках рентгеноэмульсионных камер (РЭК), экспонированных в стратосфере, в российско-японском баллонном эксперименте RUNJOB. Анализируется зависимость ошибок от соотношения угловых характеристик искомой частицы и вспомогательных фоновых многозарядных ядер. Найдены критерии отбора по углу для вспомогательных ядер, при которых методическая ошибка предсказания координат трека исследуемой частицы уменьшается.

Ключевые слова: галактические космические частицы, методика стратосферных рентгеноэмульсионных камер, поиск первичной частицы, состав первичного космического излучения.

Российско-японский баллонный эксперимент RUNJOB проводился с 1995 по 1999 гг. и был последним до настоящего времени эмульсионным экспериментом, в котором состав и спектры различных компонент галактического излучения в области энергий $\sim 10^{12} - 10^{15}$ эВ определялись с помощью методики рентгеноэмульсионных камер (РЭК) [1–4]. При обработке экспериментальных данных было отмечено, что первичные прото-

ны идентифицированы примерно в половине событий (взаимодействиях галактических частиц с веществом РЭК), отнесенных к нуклон-ядерным [5]. При детальном исследовании методических причин данного экспериментального факта, таких как большой фон частиц, регистрируемых ядерной эмульсией при ее длительном экспонировании, случайный пропуск однозарядной частицы, поскольку ионизация, производимая такой частицей, минимальна, и другие, не удалось объяснить большое число (около 50%) не найденных треков первичных протонов [6]. Поскольку статистика событий, включенных в окончательный спектр протонов эксперимента RUNJOB, была невелика из-за высокого энергетического порога отбора, то для возможности дальнейшего анализа событий, отнесенных к протонным с меньшими энергиями, потребовался другой метод поиска и прослеживания галактических частиц в ядерных эмульсиях.

Предложенный метод позволяет проводить измерения без ранее применявшейся системы: микроскоп с автоматически движущимся столом–CCD-камера–компьютер [7].

Метод был апробирован на ядро-ядерных взаимодействиях, зарегистрированных в РЭК RUNJOB, экспонировавшихся с 1996 по 1999 гг., и показал полное согласие с результатом поиска первичных ядер ($Z > 2$) методом, ранее использовавшимся в эксперименте [5]. При повторной обработке группы событий, отнесенных к протонным с энергией первичной частицы $E_0 > 20$ ТэВ и зенитным углом $\text{tg}(\theta) \leq 5$, зарегистрированных в камерах RUNJOB-3B,6A,11A,11B, с использованием нового метода так же, как и ранее, примерно 50% треков первичных протонов не обнаружено [8].

С целью оценки возможного влияния ошибок нового метода поиска и прослеживания галактических частиц на полученный результат проведено дополнительное исследование этих ошибок.

Процедура поиска треков галактических частиц, регистрируемых в РЭК. Частицы галактического излучения, попадая в РЭК, взаимодействуют с ее веществом (см. рис. 1), образуя вторичные частицы, в основном заряженные и нейтральные пионы (π^\pm, π^0), которые регистрируются в виде плотно расположенных друг к другу параллельных треков заряженных частиц в ядерно-эмульсионных пленках и в виде пятен почернения от электрон-фотонных каскадов, инициированных γ -квантами от распада π^0 мезонов, в рентгеновских пленках.

Ядерно-электромагнитные каскады, обнаруженные в нижней части установки, пролевались вверх до вершины взаимодействия по ядерным эмульсиям с использованием карт траекторий каскадов, построенных с помощью компьютерных программ. В ядерно-

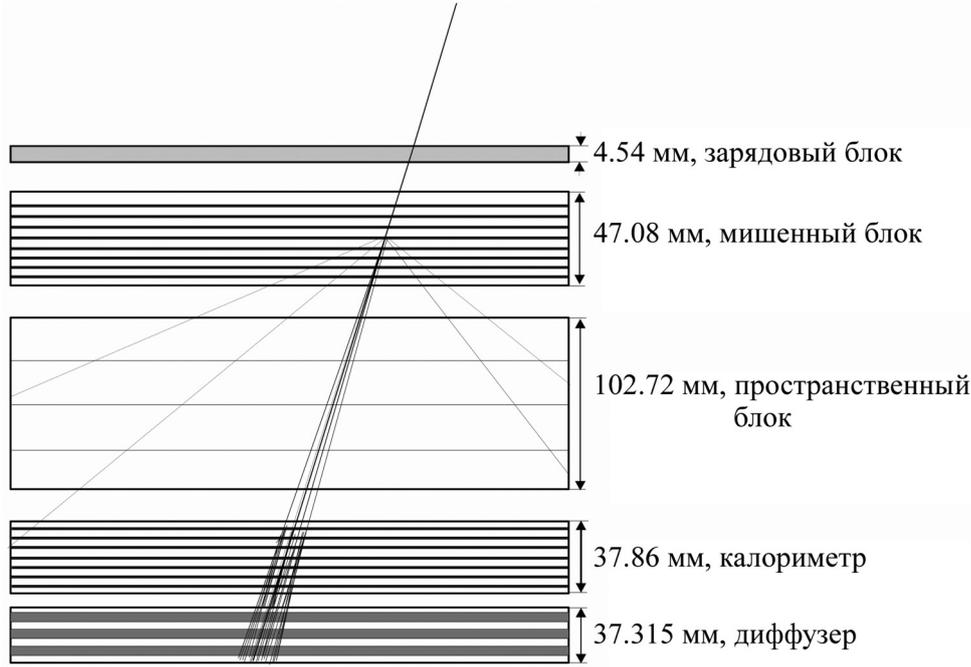


Рис. 1: Схема РЭК RUNJOB' 97.

эмульсионных пленках, лежащих над вершиной взаимодействия, проводился поиск и прослеживание трека первичной частицы.

В предложенном методе для определения координат трека искомой частицы в ядерно-эмульсионных пленках используются угловые и пространственные измерения треков нескольких (2–3) вспомогательных фоновых ядер ($Z > 8$), близко расположенных к траектории первичной частицы (1 см²). Измерения треков частиц проводятся с помощью калиброванной сетки, находящейся в одном из окуляров микроскопа, с точностью 0.1 длины ячейки сетки, и при увеличении изображения в 1000 раз точность составляет ~ 0.8 мкм.

Координаты и длины проекций трека первичной частицы рассчитываются по формулам, выведенным в работе [7]:

$$\begin{cases} X_{pr,j+1} = X_{jet,j} + \frac{\Delta X_{n,j} \cdot P_{jet,j} \cdot \sin(\beta_j)}{P_{n,j} \cdot \sin(\alpha_j)}, \\ Y_{pr,j+1} = Y_{jet,j} + \frac{\Delta Y_n \cdot (P_{b,j} - P_{jet,j} \cdot \cos(\beta_j))}{(P_{b,j} - P_{n,j} \cdot \cos(\alpha_j))}, \end{cases} \quad (I)$$

$$\begin{cases} L_{pr,j+1} = \frac{L_{n,j+1} \cdot L_{jet,j}}{L_{n,j}}, \\ P_{pr,j+1} = \frac{P_{n,j+1} \cdot P_{jet,j}}{P_{n,j}}, \end{cases} \quad (II)$$

где индекс i указывает на тип частицы (первичная частица (pr), струя вторичных частиц (jet), фоновые ядра (b, n)), j – номер эмульсионной пленки ($X_{i,j}; Y_{i,j}$), $L_{i,j}$, $P_{i,j}$ – координаты треков измеряемых частиц и длины их проекций в эмульсии и основе ядерных эмульсионных пленок, соответственно; α_j – азимутальный угол одного из фоновых ядер; β_j – азимутальный угол струи вторичных частиц; $\Delta X_{nj}, \Delta Y_{nj}$ – разница между измеренными значениями координат трека фонового ядра в j и $j + 1$ эмульсионных пленках.

Следует отметить, что измерения проводятся, как правило, на двух соседних ядерных пленках, поскольку в этом случае максимально удовлетворяется предположение, на основе которого выведены формулы (I) и (II): толщина эмульсионного слоя, основы ядерной пленки и расстояние между эмульсионными пленками в пределах малой локальной области ($\sim 1 \text{ см}^2$) постоянна.

Ось Y системы координат в новом методе совмещается с проекцией трека фонового ядра на плоскость ядерно-эмульсионной пленки, что позволяет пренебречь сдвигами и поворотами пленок в горизонтальной плоскости.

Поиск первичной частицы проводится сканированием ядерной эмульсии по площади круга с центром в точке с предсказанными координатами частицы по формулам (I) и радиусом $R = 3\delta = 3((\delta_x)^2 + (\delta_y)^2)^{1/2}$, где δ_x, δ_y – индивидуальные ошибки предсказания координат первичной частицы новым методом (ошибки метода, см. ниже). Частица-кандидат должна удовлетворять следующим требованиям:

- а) Отклонение измеренного значения азимутального и зенитного углов частицы от предсказанного не должно превышать 3° ;
- б) Ионизация, производимая частицей, на всех рассматриваемых слоях примерно одинакова;
- в) В слоях, где уже виден ливень, частица-кандидат должна отсутствовать.

Ошибки предсказания координат треков частиц новым методом поиска и прослеживания частиц в ядерных эмульсиях рентгеноэмульсионных камер. Координаты всех искомым частиц в ядерной эмульсии с использованием нового метода рассчитываются в предположении прямолинейности траекторий этих частиц:

$$\begin{cases} X_{j+1}^{\text{расч}} = X_j + \left(H_{j,j+1} \cdot \frac{P_j}{h_{\text{осн},j}} \right) \cdot \sin(\varphi_j), \\ Y_{j+1}^{\text{расч}} = Y_j + \left(H_{j,j+1} \cdot \frac{P_{b,j}}{h_{\text{осн},j}} \right) - (H_{j,j+1} \cdot P_j / h_{\text{осн},j}) \cdot \cos(\varphi_j), \end{cases} \quad (\text{III})$$

где $(X_{j+1}^{\text{расч}}, Y_{j+1}^{\text{расч}})$ – координаты частиц на $(j + 1)$ -ой пленке; $H_{j,j+1}$ – расстояние между соседними $(j + 1, j)$ эмульсионными пленками; $P_j, P_{b,j}$ – величины проекций траекторий

частицы, базисного фонового ядра в основе эмульсионной пленки на j -ом слое; $h_{\text{осн}}$ – толщина основы эмульсионной пленки; φ – азимутальный угол частицы.

Обозначим $(H_{j+1,j}/h_{\text{осн}}) \cong k^{\text{зад}}$ и $P_j \cdot \sin(\varphi_j) \cong P_x$, $(P_{b,j} - P_j \cdot \cos(\varphi_j)) \cong P_y$, тогда формулы (III) запишутся в виде:

$$\begin{cases} X_{j+1}^{\text{расч}} = X_j + k^{\text{зад}} \cdot P_x, \\ Y_{j+1}^{\text{расч}} = Y_j + k^{\text{зад}} \cdot P_y. \end{cases} \quad (\text{IV})$$

Для различных блоков всех типов РЭК эксперимента RUNJOB имеется набор параметров $k^{\text{зад}}$. На рис. 2 показано распределение отклонений экспериментальных значений $k^{\text{эксп}}$ от $k^{\text{зад}} = 6.3$ по данным обработки событий, зарегистрированных во всех типах РЭК. Видно, что $k^{\text{зад}}$ является средней величиной по всему набору измерений в эмульсионных пленках РЭК, а распределение экспериментальных значений этой величины имеет нормальный характер, без систематических отклонений.

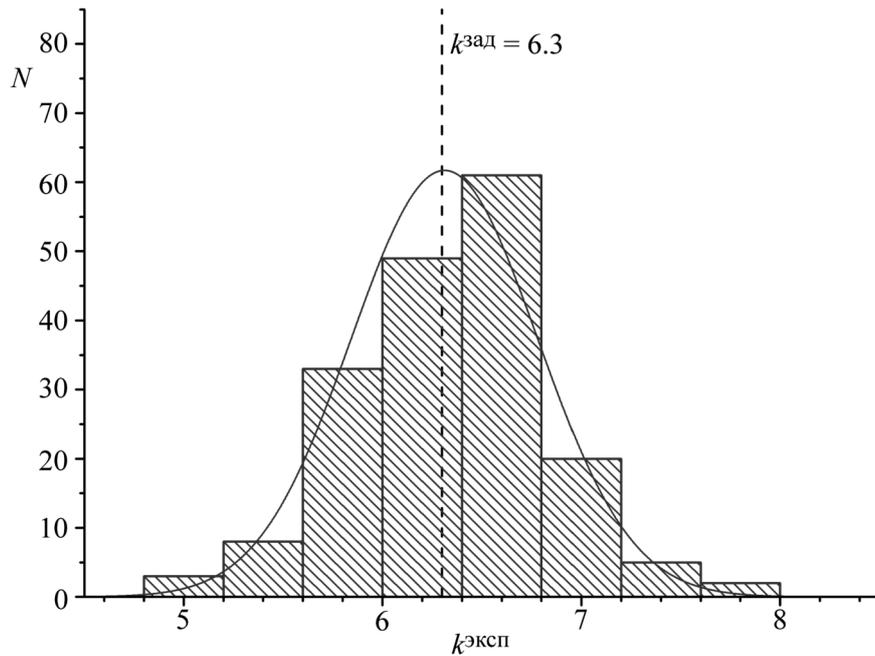


Рис. 2: Распределение отклонений экспериментальных значений $k^{\text{эксп}}$ от $k^{\text{зад}} = 6.3$.

В малой локальной области эмульсионной пленки значения $k^{\text{эксп}}$ распределены вблизи реального значения $k^{\text{реал}}$.

На рис. 3 изображена схема реальной и расчетной (по ф-лам (III)) траекторий искомой частицы в плоскости (ZOX). Ось Z направлена по вертикали к плоскости установки.

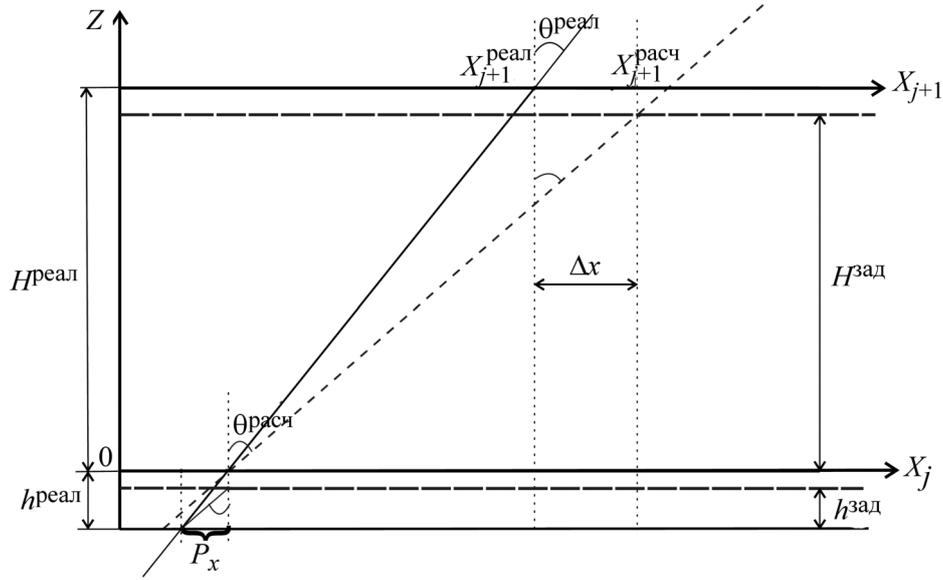


Рис. 3: Схема реальной и расчетной траекторий частицы в плоскости (ZOX).

Для предсказания реальных координат первичной частицы необходимо ввести поправку на заданное отношение параметров ($H_{j+1,j}/h_{\text{осн}}$), которая определяется по измеренным значениям координат и проекций треков вспомогательных фоновых ядер в эмульсионных пленках (см. (I)).

С учетом предположения метода о постоянстве толщин эмульсий и основ ядерных пленок и расстояния между ними в малой локальной области ошибка предсказания координат искомой частицы, как следует из формул (IV), связана с аналогичной ошибкой фонового ядра по формулам:

$$\begin{aligned}
 \text{а) } & \begin{cases} \Delta X_{pr} = X^{\text{расч}} - X^{\text{реал}} = P_{x,pr} \cdot (\kappa^{\text{зад}} - \kappa^{\text{реал}}) \\ \Delta Y_{pr} = Y^{\text{расч}} - Y^{\text{реал}} = P_{y,pr} \cdot (\kappa^{\text{зад}} - \kappa^{\text{реал}}) \end{cases} & \text{(для первичной частицы),} \\
 \text{б) } & \begin{cases} \Delta X_{я} = X^{\text{расч}} - X^{\text{реал}} = P_{x,я} \cdot (\kappa^{\text{зад}} - \kappa^{\text{реал}}) \\ \Delta Y_{я} = Y^{\text{расч}} - Y^{\text{реал}} = P_{y,я} \cdot (\kappa^{\text{зад}} - \kappa^{\text{реал}}) \end{cases} & \text{(для фонового ядра).}
 \end{aligned}$$

Из равенств а) и б) следует:

$$\Delta X_{pr} = \Delta X_{я} \frac{P_{x,pr}}{P_{x,я}} \quad \text{и} \quad \Delta Y_{pr} = \Delta Y_{я} \frac{P_{y,pr}}{P_{y,я}}. \quad (\text{V})$$

По результатам обработки нуклон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий новым методом среднеквадратичная экспериментальная ошибка (σ) предсказания координат первичной частицы составляет $\sigma = 31$ мкм (см. рис. 4).

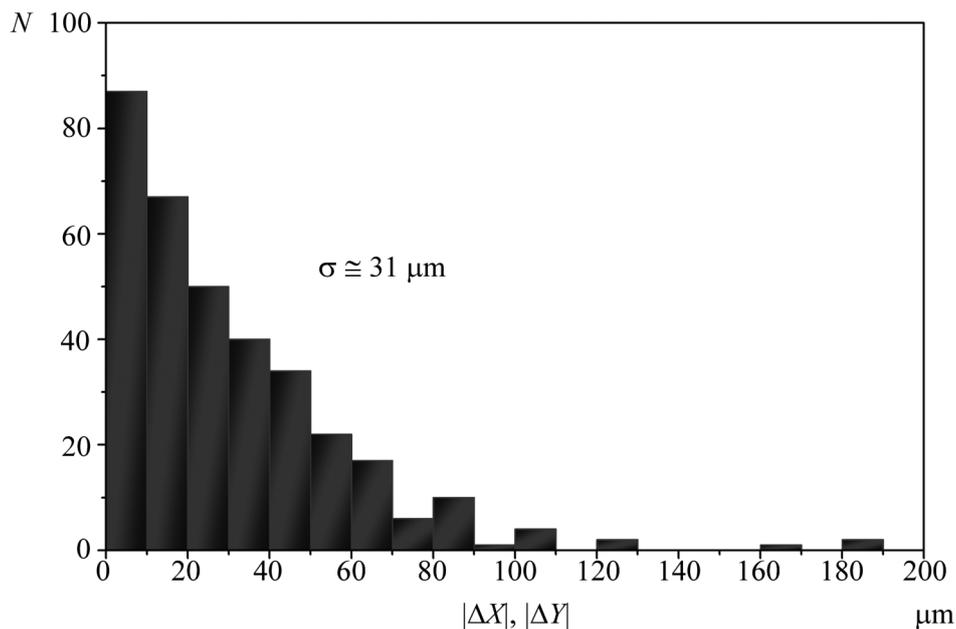


Рис. 4: Распределение отклонений координат ($|\Delta X|, |\Delta Y|$) найденных треков ядер космического излучения от предсказанных по новому методу.

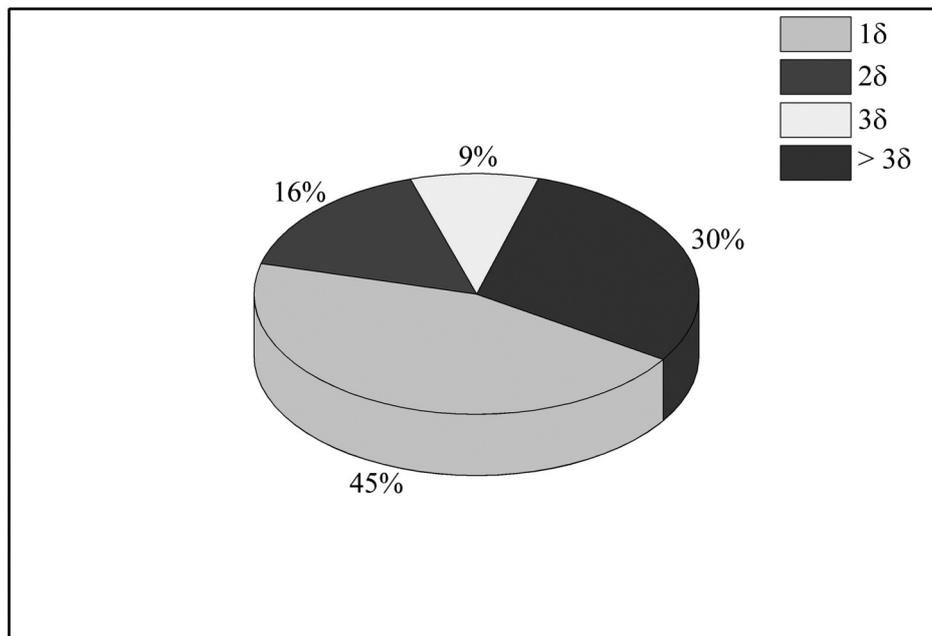


Рис. 5: Относительное число частиц, найденных в пределах расчетных ошибок: δ , 2δ , 3δ , $> 3\delta$.

Если определить область поиска первичной частицы как круг с центром в точке с предсказанными координатами и радиусом $R = 3\delta = 3(\delta_x^2 + \delta_y^2)^{1/2} = 3((\Delta X/3)^2 + (\Delta Y/3)^2)^{1/2}$, то, как видно из диаграммы (см. рис. 5), большинство первичных частиц найдено в этой области. Все события, не попавшие в эту область, имеют индивидуальную расчетную ошибку координат искомой частицы $\delta_x, \delta_y \leq 0.2$ (кл.), которая меньше среднестатистического экспериментального значения примерно в 3 раза.

На практике, если индивидуальная расчетная ошибка предсказания координат первичной частицы $\delta \leq 10$ мкм, то поиск кандидата на искомую частицу проводился по всему полю зрения в окуляре микроскопа при увеличении в 500 раз – в круге с радиусом 160 мкм, превышающим среднеквадратичную экспериментальную ошибку более чем в 5 раз.

Зависимость методических ошибок от угловых характеристик искомой первичной частицы и вспомогательных фоновых ядер. Ошибки предсказания координат для искомой (первичной) частицы, как видно из равенств (V), зависят от соотношений зенитных и азимутальных углов вспомогательных фоновых ядер и самой искомой частицы. Если подобрать фоновые ядра с близкими к первичной частице угловыми характеристиками, то ошибки предсказания координат для первичной частицы будут близки к ошибкам предсказания координат для вспомогательного фонового ядра. В то же время, чем больше зенитный угол вспомогательных ядер и разница ($\kappa^{\text{зад}} - \kappa^{\text{реал}}$), тем больше $\Delta X_{\text{я}}, \Delta Y_{\text{я}}$.

Для уменьшения методической ошибки δ для искомой частицы необходимо подбирать вспомогательные ядра так, чтобы выполнялись следующие условия:

$$\begin{cases} 0 < \frac{P_{pr} \cdot \sin \beta}{P_n \cdot \sin \alpha} < 1, \\ 0 < \frac{(P_b - P_{\text{jet},j} \cdot \cos(\beta_j))}{(P_{b,j} - P_{n,j} \cdot \cos(\alpha_j))} < 1. \end{cases} \quad (\text{I})$$

Из неравенств (I) следует, что если азимутальный угол первичной частицы $\beta \rightarrow 0$, а зенитный угол вспомогательного ядра близок к зенитному углу искомой частицы ($P_{pr} \approx P_{\text{я}}$), то условия (I) выполняются при любых $\alpha \neq \beta$, т.е. имеется большая свобода выбора вспомогательного ядра по азимутальному углу.

Однако при малой экспериментальной ошибке предсказания координаты X для вспомогательного ядра, при $\beta \rightarrow 0$ получается заниженная ошибка предсказания координаты X для первичной частицы ($\Delta X_{pr} \rightarrow 0$).

На практике для первичных частиц с зенитным углом $\theta > 60^\circ$ в малой локальной области редко существуют вспомогательные ядра с близкими зенитными углами. Поэтому

подбираются вспомогательные ядра с большими, чем у первичной частицы, азимутальными углами. При этом величина азимутальных углов всех используемых частиц не должна превышать 45° , поскольку по условиям нового метода при продлении частиц на вышележащий слой они не должны находиться далеко друг от друга.

По экспериментальным данным средний азимутальный угол используемых для поиска и продления галактических частиц составил $\langle \varphi \rangle \sim 27^\circ$.

Для первичных частиц с большими зенитными углами, как видно из условий (I), необходимо, чтобы зенитные углы вспомогательных ядер отличались так, чтобы разница $(P_{b,j} - P_{n,j} \cdot \cos(\alpha_j))$ не стремилась к нулю. В противном случае мы получим большую ошибку в предсказании координаты первичной частицы по оси (OY).

По экспериментальным данным ошибка предсказаний координат частиц в двух группах событий, при обработке которых условия подбора фоновых ядер (I) выполнялись или нет, отличается примерно в 1.5 раза, т.е. местоположение искомым частиц определяется точнее при подборе фоновых ядер с учетом условий (I).

Заключение. Проведенное дополнительное исследование ошибок предсказания координат треков галактических частиц новым методом поиска и прослеживания частиц в ядерно-эмульсионных пленках РЭК RUNJOB позволило определить угловые критерии отбора вспомогательных фоновых ядер, при которых точность предсказания координат частицы в ядерных пленках улучшается. Однако уменьшение ошибки предсказания координат трека не привело к объяснению методическими причинами отсутствия в ядерных эмульсиях большого ($\sim 50\%$) количества треков первичных частиц из взаимодействий, отнесенных в эксперименте RUNJOB к нуклон-ядерным. При повторном поиске первичных частиц новым методом в группе взаимодействий, зарегистрированных в РЭК RUNJOB-3B,6A, отнесенных к нуклон-ядерным, с энергией, выделившейся в нейтральную компоненту $3 \leq \Sigma E_\gamma \leq 5$ ТэВ, так же как и ранее, около половины треков первичных частиц не обнаружено. Полученный результат требует обработки дополнительных взаимодействий с целью увеличения статистики событий и дальнейшего анализа экспериментальных данных.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] C. J. Todero Peixoto et al., Cosmic rays: the spectrum and chemical composition from 10^{10} to 10^{20} eV. arXiv: astro-ph/1502305.
- [2] A. Obermeier, M. Ave, P. Boyle, et al., Astropart. J. **742**, 14 (2011).
- [3] Y. S. Yoon, H. S. Ahn, P. S. Allison, et al., Astropart. J. **728**, 122 (2011).

- [4] M. Nareyama et al., Proton and Helium spectra obtained by RUNJOB experiment, Proc. 29th ICRC, V3:OG1.1, p. 17 (2005),
www.icrr.u-tokyo.ac.jp/can/icrc2005/Proceedings/Volume3_index.html.
- [5] A. V. Aranasenko et al., Astroparticle Phys. **16**, 13 (2001).
- [6] И. С. Заярная, ЯФ **71**(2), 1 (2008).
- [7] И. С. Заярная, Препринт № 1 (ФИАН, Москва, 2010).
- [8] И. С. Заярная, Краткие сообщения по физике ФИАН **40**(11), 29 (2013).

Поступила в редакцию 22 марта 2016 г.