

ПРЕПРИНТ

И.С.ЗАЯРНАЯ

НОВЫЙ МЕТОД ПОИСКА И ПРОДЛЕНИЯ ПЕРВИЧНЫХ  
КОСМИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ В СТРАТОСФЕРНЫХ  
РЕНТГЕНОЭМУЛЬСИОННЫХ КАМЕРАХ.

## **Новый метод поиска и продления первичных космических частиц в стратосферных рентгеноэмульсионных камерах.**

### **Абстракт.**

В работе рассматривается новый метод поиска первичных космических частиц, регистрируемых в ядерных фотоэмульсиях, экспонированных в течение длительного времени в стратосфере. Предложенный метод сравнивается с методами поиска и продления частиц в баллонных экспериментах ФИАН, RUNJOB, MUBEE, JACEE. Апробация нового метода проведена для событий из камер российско-японского эксперимента RUNJOB. Было получено, что использование предложенного метода позволяет находить первичную частицу с точностью до  $\sim 10$  мкм, достаточной для выделения однозарядной частицы из фона частиц, набираемого эмульсиями при длительной экспозиции.

### **Abstract.**

In the preprint the new method for searching of the primary cosmic-ray registered by nuclear emulsions exposed in long duration in stratospheric is presented. Proposed method is compared with methods for searching and tracing up of particles used by FIAN, RUNJOB, MUBEE, JACEE balloon experiments. The test of new method was made for events from x-ray emulsion chamber of RUssian – Nippon JOint Balloon (RUNJOB) experiment. In result the new method allows to search the primary particle with accuracy until  $\sim 10$  mkm enough for the identification of proton behind the background in the case of long duration emulsion exposition.

## Введение.

Для исследования первичных космических частиц с энергиями  $> 1$  ТэВ методика с использованием рентгеноэмульсионных камер (РЭК), экспонируемых в стратосфере, применялась в различных экспериментах (ФИАН[1,2], JACEE[3,4], MUBEE[5], RUNJOB[6]).

Детекторами первичных космических частиц в установках различных конструкций были односторонние или двухсторонние ядерно-эмульсионные фотопленки, которые являются до сих пор лидерами среди детекторов по пространственному разрешению частиц (две релятивистские однозарядные частицы различимы на расстоянии 1  $\mu\text{m}$ ). Благодаря этому качеству эмульсионных детекторов в экспериментах ФИАН [7] и JACEE [8] решались задачи по исследованию ядро - ядерных и нуклон - ядерных взаимодействий высоких энергий ( $E_0 > 1\text{ТэВ/нуклон}$ ), когда, например, для анализа угловых распределений вторичных заряженных частиц, образованных во взаимодействиях космических частиц с мишенями рентгеноэмульсионных камер, требовалось находить и проследить вторичные частицы в нескольких слоях. В первичную обработку любого баллонного эксперимента с использованием РЭК входит процедура нахождения вершины взаимодействия нуклонов и ядер первичного космического излучения (ПКИ) с ядром вещества камеры, а затем поиска трека первичных частиц. Схематически детектирование космических частиц происходит следующим образом. Высокоэнергичные нуклоны и ядра ПКИ, попадая в рентгеноэмульсионную камеру (см. рис.1), взаимодействуют с ядрами мишени, образуя струю вторичных частиц, состоящую, в основном, из  $\pi^\pm$ ,  $\pi^0$  мезонов.

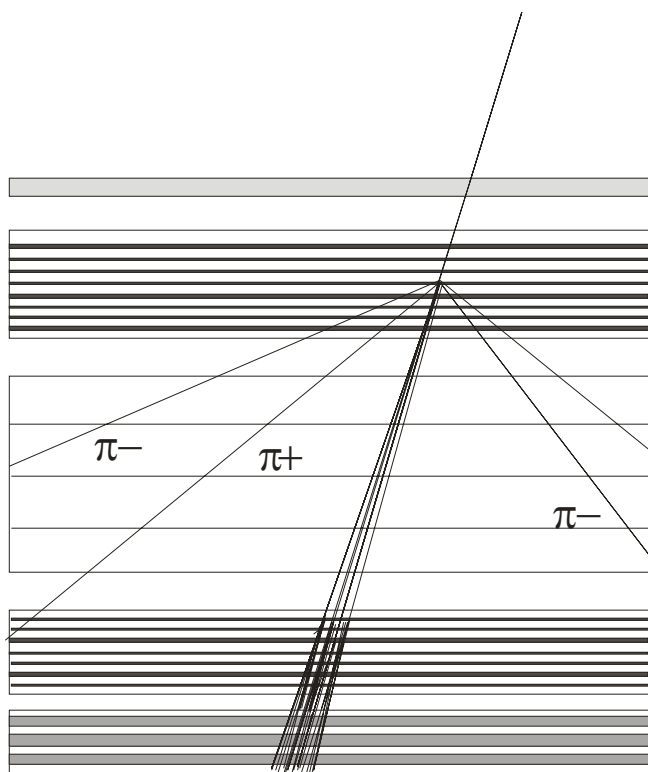


Рис.1 Схема прохождения первичной космической частицы в РЭК

Нейтральные пионы дают начало электрон-фотонным каскадам (ЭФК), которые регистрируются невооруженным глазом в рентгеновских пленках калориметра в виде пятен почернения. Обнаруженные в рентгеновских пленках каскады находятся затем в соответствующих листах ядерных эмульсий и прослеживаются из слоя в слой до эмульсионной пленки, выше которой в пластине мишени (например, состоящей из ядер Fe) находится вершина взаимодействия.

В длительных полетах РЭК в стратосфере на глубине  $\sim 10 \text{ г/см}^2$  спектр космических лучей исследовался в интервале от нескольких ТэВ до  $10^3 \text{ ТэВ}$ . В этом энергетическом диапазоне основная масса частиц – первичные протоны, которые сложнее всего обнаружить в загруженной фоновыми частицами эмульсии, экспонированной более 100 часов. Методики поиска первичных космических частиц в РЭК в экспериментах JACEE, RUNJOB позволяли получать индивидуальную погрешность для координат искомого трека около  $10 \text{ мкм}$ , однако для  $\sim 50\%$  протонных событий в эксперименте RUNJOB [9] первичный трек в области поиска не наблюдался. Ранее проводилась методическая проверка данного результата для группы высокоэнергичных событий из нескольких РЭК в эксперименте RUNJOB [10], которая подтвердила отсутствие первичного одно-

зарядного трека, примерно, в половине протонных событий. Для окончательного вывода о составе протонной группы событий необходимо было рассмотреть больший экспериментальный материал, включающий события с меньшими энергиями ( $\Sigma E_\gamma < 5$  ТэВ). Для решения этой задачи возникла необходимость в новом методе поиска и продления первичной космической частицы, без использования автоматически движущегося предметного стола, входящего в комплекс оборудования, применяемого в RUNJOB [11].

В настоящей работе проводится описание и обсуждение предложенного нового метода поиска и продления космических частиц, регистрируемых в РЭК, в котором используются, как и в других аналогичных экспериментах, близко расположенные к искомой частице фоновые ядра.

### Конструкция рентгеноэмульсионных камер.

Экспериментальный материал, который использовался для апробации предложенного метода поиска первичной космической частицы, был получен в результате экспонирования рентгеноэмульсионных камер – RUNJOB-ШВ, XI-A, В. Длительность полетов камер составляла 134 и 146 часов соответственно. Глубина остаточной атмосферы над РЭК была около  $9.4 \text{ г/см}^2$ . Конструкция камер изображена на рис.2а, б.

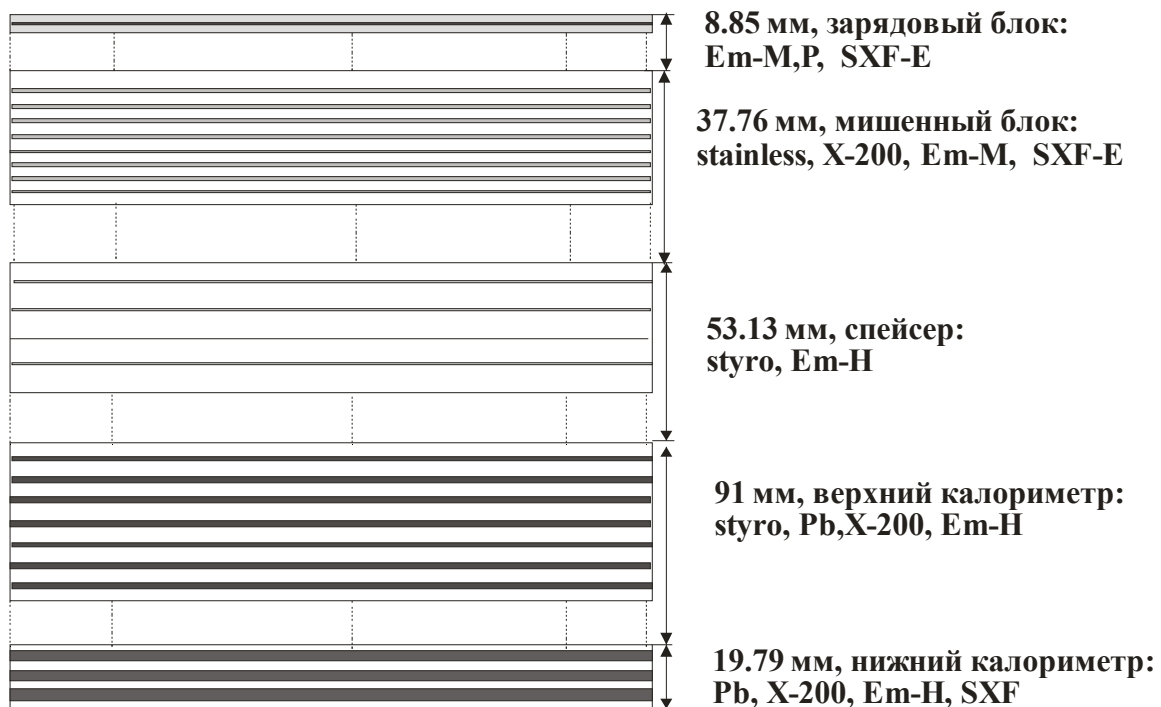


Рис.2 а. Схема камеры RUNJOB-IIIВ

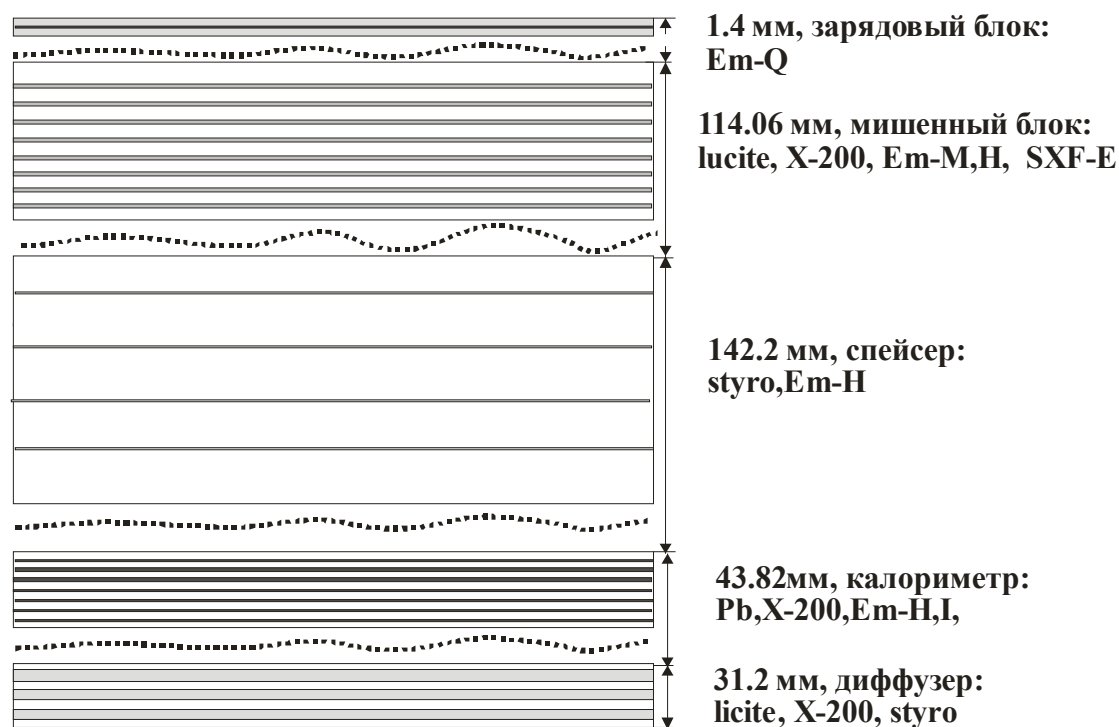


Рис.2 б. Схема камеры RUNJOB-XI(A,B)

Рентгеноэмульсионные камеры состоят из зарядового блока, предназначенного для определения заряда первичной частицы; мишенного блока, где первичные частицы взаимодействовали с атомами вещества мишени; спейсера, необходимого для пространственного расхождения вторичных частиц; калориметра и диффузера, в которых развивались и расходились электронно-фотонные каскады от нейтральной компоненты ядерного взаимодействия. На схеме указаны материалы, входящие в каждый блок: различные типы ядерных (Em-Q и др.) и рентгеновских (X-200, SXF) пленок, стальные (stainless), пластиковые (lucite) и свинцовые (Pb) пластины. Детекторы космического излучения - двухсторонние ядерные эмульсионные пленки различного типа японского производства (см. Таблица 1), размером (40 x 50) см<sup>2</sup>, чередовались с пластинами: а) мишеней(Fe, C), б) пенопласта и с) свинца

Тип эмульсионной пленки	Толщина (мкм)		
	Верхняя эмульсия	Основа	Нижняя эмульсия

Em-Q	100	500	100
Em-M	60	800	60
Em-H	60	500	60
Em-I	60	500	60

Таблица 1. Различные типы ядерных эмульсионных пленок.

в нижней части камер - калориметре, где регистрируются электронно-фотонные каскады из взаимодействий космических частиц с веществом камеры и по их суммарной энергии определяется энергия первичной частицы. Средняя высота мишеных блоков в единицах ядерного пробега взаимодействия протонов в обоих экспериментах составляла  $\sim 0.17$ , а толщина калориметра в каскадных единицах – от 3.6 до 5.17 т-ед. Расстояние между ядерными эмульсионными пленками, расположенных в различных частях камер, изменялось от  $\sim 0.3$  см до  $\sim 2,5$  см.

### Концепции определения местоположения первичной частицы в различных эмульсионных баллонных экспериментах.

Схематически трек первичного ядра в двухсторонней ядерно-эмульсионной пленке показан на рис.3.

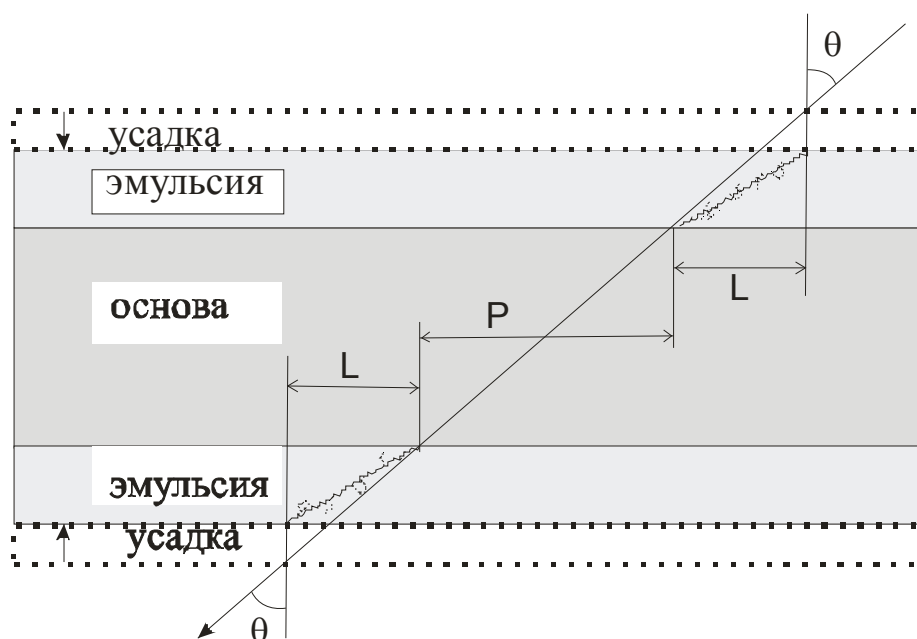


Рис.3 Трек ядра первичного космического излучения в ядерно-эмульсионной пленке.

Измеряя проекцию трека в эмульсии или в основе пленки можно определить зенитный угол  $\theta$  (угол между вертикалью к поверхности пленки и направлением движения частицы):

$$\theta = \arctg ( L/h_{эм}) = \arctg ( P/h_{осн}) \quad (1) \quad , \text{ где}$$

$h_{эм}$  – толщина эмульсионного слоя до проявки ядерной пленки,

$h_{осн}$  – толщина основы,

$L$  – проекция трека в эмульсии

$P$  - проекция трека в основе ядерно-эмульсионной пленки

Для определения местоположения трека частицы в слоях, лежащих над вершиной взаимодействия, в методиках баллонных эмульсионных экспериментов было необходимо:

1. Выбрать систему координат.
2. Измерить координаты ядерно-электромагнитного каскада, инициированного первичной частицей, в слое (или слоях), расположенных ниже точки (вершины) взаимодействия.
3. Определить зенитный и азимутальный углы ( $\theta$ ,  $\varphi$ ) ядерно-электромагнитного каскада.
4. Рассчитать сдвиги и повороты пленок относительно друг друга.
5. Определить область поиска частицы.

Выбор системы координат для измерения параметров траекторий исследуемых каскадов или первичных частиц в эмульсионных баллонных экспериментах отличался друг от друга. Например, в эксперименте ФИАН на ядерные пленки фото-способом наносилась координатная сетка размером  $1 \times 1 \text{ мм}^2$ , относительно которой проводились все измерения [12]. В эксперименте MUBEE оси координат соответствовали линиям разреза пленок, определяемые по системе рентгеновских меток [13]. В эксперименте RUNJOB начало координат располагалось в одном из углов пленок, а координатные оси по сторонам пленок [14].



Измерив координаты  $(X_j, Y_j)$ , зенитный и азимутальный угол ядерно-электромагнитного каскада на одной эмульсионной пленке РЭК, можно рассчитать его координаты на другой, используя простые соотношения:

$$\begin{cases} X_{j+1}^{\text{расч}} = X_j + (H_{j+1,j} * \text{tg}\theta) * \cos \varphi \\ Y_{j+1}^{\text{расч}} = Y_j + (H_{j+1,j} * \text{tg}\theta) * \sin \varphi \end{cases} \quad (2) \quad , \text{ где}$$

$j$  – индекс номера слоя

$H_{j+1,j}$  – расстояние между соседними  $(j+1, j)$  слоями эмульсионных пленок

$\theta, \varphi$  - зенитный и азимутальный угол направления движения каскада, соответственно.

Измеренные (экспериментальные) координаты каскада на вышележащей пленке, конечно, отличаются от расчетных, т.к. существуют относительные повороты, смещения пленок, неточности в определении углов каскада, а так же использование среднего расстояния между эмульсиями. Для того чтобы уменьшить ошибку предсказаний координат местоположения исследуемого события, во всех упомянутых экспериментах использовались фоновые ядра, по результатам обработки траекторий которых методом наименьших квадратов, «сшивались» слои РЭК, т.е. определялись поправки на смещения, повороты пленок относительно друг друга и расстояния между ними. Область поиска первичной частицы (или ядерно-электромагнитного каскада) - круг на поверхности эмульсии с центром в точке предсказания местоположения частицы (каскада) и радиусом около  $3\sigma$ , где  $\sigma$  - среднеквадратичная ошибка метода предсказания координат. Значение этой ошибки в разных баллонных эмульсионных экспериментах представлено в Таблице 2.

Эксперимент	Среднеквадратичная ошибка предсказания координат трека первичных частиц
ФИАН [11]	20-70 мкм
MUBEE [15]	100-140 мкм
RUNJOB [9]	20-50 мкм
JACEE [16]	10-? мкм

## **Описание нового метода поиска и прослеживания первичных космических частиц.**

Метод поиска первичной частицы, инициировавшей ядерно-электромагнитный каскад в РЭК, включает в себя определение координат местоположения, области поиска первичной частицы, и сканирование рассчитанной области эмульсии с помощью оптического микроскопа с целью нахождения трека частицы с такими же угловыми характеристиками, как у ядерно-электромагнитного каскада.

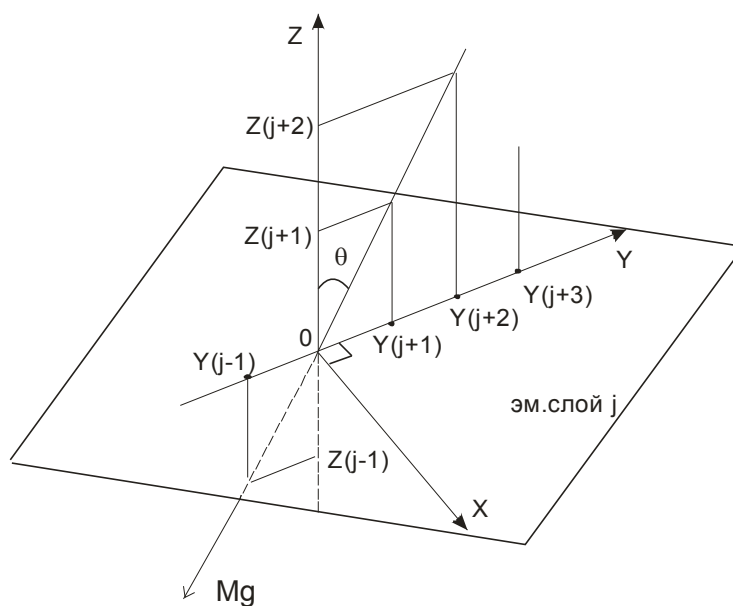
Предлагаемый новый метод поиска и прослеживания первичной частицы включает в себя несколько этапов измерений, но в основе метода лежат два предположения:

1. Траектории анализируемых в эксперименте нуклонов и ядер первичного космического излучения (ПКИ), в РЭК - прямые линии.
2. Толщина эмульсионного слоя, основы ядерной пленки и расстояние между эмульсионными пленками в пределах малой локальной области ( $\sim 1 \text{ см}^2$ ) почти не меняется.

Первое предположение используется во всех баллонных эмульсионных экспериментах для определения параметров траекторий фоновых и искомых первичных частиц из найденных взаимодействий [11-15], а второе – согласуется с многочисленными экспериментальными измерениями.

На первом этапе проводятся измерения в эмульсионной пленке, расположенной ниже вершины взаимодействия ( $j$ -ой пленке).

1. В ядерной эмульсии выбираются близко расположенные к исследуемому событию (струе вторичных частиц- jet) фоновые ядра - две многозарядные частицы с близкими к jet зенитными и азимутальными углами в круге радиусом  $\sim 1.5 \text{ мм}$  для того, чтобы на вышележащем слое эти ядра были бы расположены близко к первичной частице.
2. Вводится система координат, связанная с одним из фоновых ядер, которое в дальнейшем будем называть базисным. Начало координат находится, например, в точке входа траектории этого ядра в эмульсию, ось (OY) направлена вдоль его проекции траектории на эмульсионную плоскость, а ось (OZ)- перпендикуляр к этой плоскости (см.рис.3).



3. В этой координатной системе измеряются азимутальные углы и координаты второго фонового ядра (далее будем называть его вспомогательным) и оси разлета вторичных частиц (ливня) в плоскости эмульсии (ХОУ). В результате получаем набор значений  $(X_{ij}, Y_{ij})$ ,  $\alpha_j, \beta_j$  где индекс  $i$  указывает на тип измеряемого следа (ядро, ливень), а  $j$  - на номер эмульсионной пленки;  $\alpha$ -азимутальный угол вспомогательного ядра,  $\beta$  - ливня.

4. Измеряются проекции траекторий вспомогательного и базисного ядер, оси ливня в эмульсии и основе  $j$ -ой пленки. Получаем набор  $(L_{ij}, P_{ij})$ .

Поскольку базисное ядро - многозарядная частица ( $Z \geq 12$ ), то при точности сшивки слоев в РЭК RUNJOB  $\sim 100$   $\mu\text{м}$  оно легко находится при небольшом увеличении ( $\times 40$ ) стереомикроскопа при совмещении слоев друг с другом по направлению проекции траектории.

По данным измерений на  $j$ -ой пленке рассчитываются зенитные углы частиц -  $\{\theta_{ij}\}$ , используя формулу (1) и предсказывается местоположение вспомогательного фонового ядра на вышележащий  $j+1$  слой по формулам III:

$$\text{III} \begin{cases} X_{i,j+1}^{\text{расч}} = X_{i,j} + \left( H_{j+1,j} * \frac{P_{i,j}}{h_{\text{осч},j}} \right) * \sin(\varphi_j) \\ Y_{i,j+1}^{\text{расч}} = Y_{i,j} + \left( H_{j+1,j} * \frac{P_{b,j}}{h_{\text{осч},j}} \right) - \left( H_{j+1,j} * P_{i,j} / h_{\text{осч},j} \right) * \cos(\varphi_j) \end{cases}$$

где

$\varphi$  – азимутальный угол ядра ( $\alpha$ ) или первичной частицы ( $\beta$ )

На следующем этапе метода для найденного вспомогательного ядра на вышележащем ( $j+1$ ) слое выполняются следующие измерения:

1. Координаты  $X_{\text{я},j+1}^{\text{изм}}$ ,  $Y_{\text{я},j+1}^{\text{изм}}$
2. Проекции в эмульсии и основе пленки ( $L_{\text{я},j+1}$ ,  $P_{\text{я},j+1}$ )
3. Азимутальный угол  $\alpha_{j+1}$

Опираясь на предположение 2, длина проекции ( $P_{\text{пр}}$ ) трека первичной частицы в основе  $j+1$  эмульсионной пленки определяется из равенств I:

$$\text{I} \begin{cases} P_{i,j} = h_{\text{осч},j} * \text{tg}(\theta_i) \\ P_{i,j+1} = h_{\text{осч},j+1} * \text{tg}(\theta_i) \end{cases} \Rightarrow$$

$$\frac{h_{\text{осч},j+1}}{h_{\text{осч},j}} = \frac{P_{\text{я},j+1}}{P_{\text{я},j}} = \frac{P_{\text{пр},j+1}}{P_{\text{jet},j}} \Rightarrow P_{\text{пр},j+1} = \frac{P_{\text{я},j+1} * P_{\text{jet},j}}{P_{\text{я},j}}$$

Длина проекции ( $L_{\text{пр}}$ ) трека первичной частицы в  $j+1$  эмульсионном слое вычисляется из -II

$$\text{II} \begin{cases} L_{i,j} = h_{\text{эм},j} * \text{tg}(\theta_i), \\ L_{i,j+1} = h_{\text{эм},j+1} * \text{tg}(\theta_i), \end{cases} \Rightarrow$$

$$\frac{h_{\text{эм},j+1}}{h_{\text{эм},j}} = \frac{L_{\text{я},j+1}}{L_{\text{я},j}} = \frac{L_{\text{пр},j+1}}{L_{\text{пр},j}} \Rightarrow L_{\text{пр},j+1} = \frac{L_{\text{я},j+1} * L_{\text{jet},j}}{L_{\text{я},j}}$$

Таким образом, сравнивая длины проекций траекторий фоновых ядер на двух ядерных пленках  $(j, j+1)$ , можно определить проекции трека первичной космической частицы в эмульсии и основе  $(j+1)$  пленки.

Разница между измеренными и расчетными координатами вспомогательного ядра на  $j+1$  слое вычисляется по формулам IV:

$$IV \begin{cases} \Delta X_{\text{я}} = X_{\text{я}, j+1}^{\text{ИЗМ}} - X_{\text{я}, j} = H_{j+1, j} * P_{\text{я}, j} / h_{\text{осн}, j} * \sin(\alpha_j) \\ \Delta Y_{\text{я}} = Y_{\text{я}, j+1}^{\text{ИЗМ}} - Y_{\text{я}, j} = H_{j+1, j} * \left( \frac{P_{\text{б}, j}}{h_{\text{осн}, j}} - \frac{P_{\text{я}, j}}{h_{\text{осн}, j}} * \cos(\alpha_j) \right) \end{cases}$$

Аналогично, сравнивая на сколько измеренные координаты вспомогательного ядра отличаются от предсказанных, можно рассчитать координаты первичного трека. Для этого разницу между экспериментальными и рассчитанными координатами по формулам III для первичной частицы

$$V \begin{cases} \Delta X_{\text{пр}} = X_{\text{пр}, j+1}^{\text{ЭКСП}} - X_{\text{пр}, j} = (H_{j+1, j} * P_{\text{пр}, j} / h_{\text{осн}, j}) * \sin(\beta_j) \\ \Delta Y_{\text{пр}} = Y_{\text{пр}, j+1}^{\text{ЭКСП}} - Y_{\text{пр}, j} = H_{j+1, j} * \left( \frac{P_{\text{б}, j}}{h_{\text{осн}, j}} - \frac{P_{\text{пр}, j}}{h_{\text{осн}, j}} * \cos(\beta_j) \right) \end{cases}$$

поделим на равенства IV для вспомогательного ядра и получим искомые координаты первичной частицы  $(X_{\text{пр}, j+1}^{\text{ЭКСП}}, Y_{\text{пр}, j+1}^{\text{ЭКСП}})$  на  $j+1$  слое:

$$\frac{\Delta X_{\text{я}}}{\Delta X_{\text{пр}}} = \frac{P_{\text{я}, j} * \sin(\alpha_j)}{P_{\text{пр}, j} * \sin(\beta_j)} \Rightarrow \Delta X_{\text{пр}} = \frac{\Delta X_{\text{я}} * P_{\text{пр}, j} * \sin(\beta_j)}{P_{\text{я}, j} * \sin(\alpha_j)} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow X_{\text{пр}, j+1}^{\text{ЭКСП}} = X_{\text{пр}, j} + \Delta X_{\text{пр}} = X_{\text{пр}, j} + \frac{\Delta X_{\text{я}} * P_{\text{пр}, j} * \sin(\beta_j)}{P_{\text{я}, j} * \sin(\alpha_j)};$$

$$\frac{\Delta Y_{\text{я}}}{\Delta Y_{\text{пр}}} = \frac{(P_{\text{б}, j} - P_{\text{я}, j} * \cos(\alpha_j))}{(P_{\text{б}, j} - P_{\text{пр}, j} * \cos(\beta_j))} \Rightarrow \Delta Y_{\text{пр}} = \frac{\Delta Y_{\text{я}} * (P_{\text{б}, j} - P_{\text{пр}, j} * \cos(\beta_j))}{(P_{\text{б}, j} - P_{\text{я}, j} * \cos(\alpha_j))} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Y_{pr, j+1}^{эксп} = Y_{pr, j} + \Delta Y_{pr} = Y_{pr, j} + \frac{\Delta Y_{я} * (P_{b, j} - P_{jet, j} * \cos(\beta_j))}{(P_{b, j} - P_{я, j} * \cos(\alpha_j))}$$

В результате по измерениям характеристик трека вспомогательного ядра в эмульсиях и основах двух пленок ( $j, j+1$ ) и координат, угловых характеристик оси ливня в  $j$ -ом слое, координаты и длины проекций трека первичной частицы в эмульсии и основе на  $(j+1)$  слое, определяются равенствами VI и VII:

$$VI \left\{ \begin{array}{l} X_{pr, j+1}^{эксп} = X_{pr, j} + \frac{\Delta X_{я} * P_{jet, j} * \sin(\beta_j)}{P_{я, j} * \sin(\alpha_j)} \\ Y_{pr, j+1}^{эксп} = Y_{pr, j} + \frac{\Delta Y_{я} * (P_{b, j} - P_{jet, j} * \cos(\beta_j))}{(P_{b, j} - P_{я, j} * \cos(\alpha_j))} \end{array} \right.$$

$$VII \left\{ \begin{array}{l} L_{pr, j+1} = \frac{L_{я, j+1} * L_{pr, j}}{L_{я, j}} \\ P_{pr, j+1} = \frac{P_{я, j+1} * P_{jet, j}}{P_{я, j}} \end{array} \right.$$

Относительные повороты пленок учитываются по измерениям азимутального угла для вспомогательного ядра. Поправка на азимутальный угол для первичной частицы зависит от взаимного расположения вспомогательного ядра и ливня в выбранной системе координат. Например, для расположения треков на рис.4,

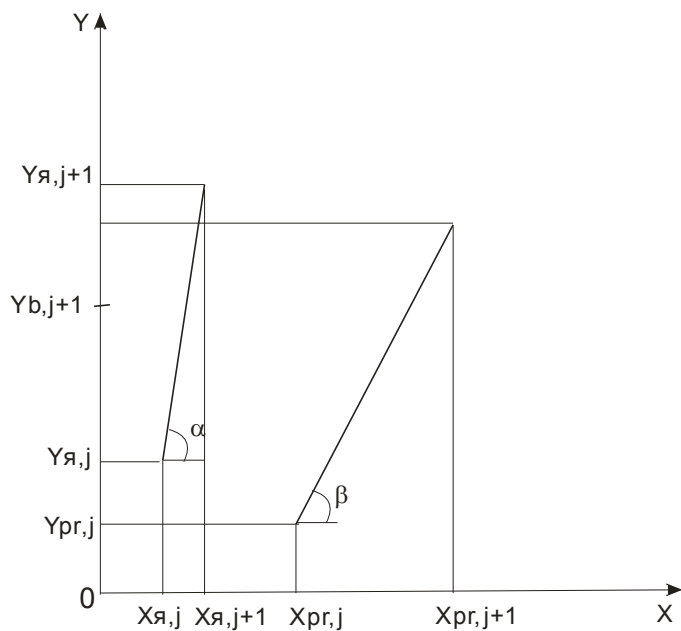


Рис.4. Схема взаимного расположения вспомогательного ядра и первичной частицы относительно базового фонового ядра.

при уменьшении азимутального угла вспомогательного ядра на вышележащем слое азимутальный угол первичной частицы уменьшается, т.к. треки этих частиц сонаправлены в выбранной системе координат. Область поиска первичной частицы рассчитывается с учетом разницы между предсказанием координат по формулам III и VI.

### **Точность предсказания координат первичной частицы.**

Для определения координат искомой первичной частицы, как видно из формул VI, используются только измерительные значения характеристик треков фоновых ядер и оси разлета вторичных частиц из взаимодействия. Каждая величина, входящая в правую часть равенств VI и VII, имеет измерительную ошибку, зависящую от увеличения микроскопа, поскольку изменяется цена деления измерительной шкалы. В эксперименте для предсказания местоположения частиц обычно использовалось ~ двухсоткратное увеличение, при котором длина трека измерялась с точностью равной 1/10 линейного размера ячейки масштабной сетки, расположенной в окуляре микроскопа, что составляет ~ 3 мкм. Погрешность в определении азимутального угла частиц составляла ~ 1°.

Аналитически среднеквадратичную ошибку для координат первичной частицы можно вычислить, как ошибку функции по стандартной формуле:

$$\sigma(f(x_1, x_2, \dots, x_n)) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \delta x_n\right)^2}.$$

Поскольку расчетные  $X_{pr, j+1}^{эксп}$ ,  $Y_{pr, j+1}^{эксп}$  – сложные функции, то для определения области поиска первичной частицы вычислялась разница между значениями координат, предсказанными по формулам III и VI, т.е. без учета и с учетом поправки на азимутальный угол и расстояние между слоями эмульсии соответственно.

Область поиска первичной частицы - это круг с центром в точке предсказания и радиусом около  $3\sigma$ , где  $\sigma$  - ошибка в определении координат местоположения первичной. В этой области осуществляется поиск частицы по ряду критериев, подробно описанных в работе [12], которые позволяют надежно идентифицировать искомый трек из фона частиц:

1. Отклонение измеренного значения азимутального и зенитного углов частицы не должно превышать  $3^\circ$ .
2. Ионизация, производимая частицей, на всех рассматриваемых слоях примерно одинакова.
3. В слоях, где уже виден ливень, частица-кандидат должна отсутствовать.

### **Апробация метода.**

Для проверки предложенного метода использовался экспериментальный материал, полученный при экспонировании рентгено-эмульсионных камер RUNJOB XI-A,B, RUNJOB IIIB российского-японского эксперимента RUNJOB. Отбирались ядерные события ( $Z \geq 2$ ) с различными зенитными углами ( $\text{tg } \theta < 5$ ) и энергиями ( $\Sigma E_\gamma \geq 0,5$  ТэВ). На рис. 5 а, б показано распределение отклонений измеренных координат треков первичных ядер от предсказанных-  $|\Delta X|$ ,  $|\Delta Y|$ ,  $\Delta R = (\Delta X^2 + \Delta Y^2)^{1/2}$ .

Как видно, среднее значение точности предсказания координат первичных ядер с использованием нового метода -  $\langle \Delta R \rangle \approx 40$  мкм несколько лучше, чем ранее полученное в эксперименте RUNJOB -  $\sim 57$  мкм [17]. Для отдельных



событий ошибка метода составляла около 10 мкм. Таким образом, используя новый метод поиска частиц первичного космического излучения, можно осуществлять как дальнейшую обработку экспериментального материала в более низком энергетическом интервале, например, для событий из камер RUNJOB XI (А,В), так и для решения задачи по поиску треков протонов в событиях, зарегистрированных в рентгеноэмульсионных камерах.

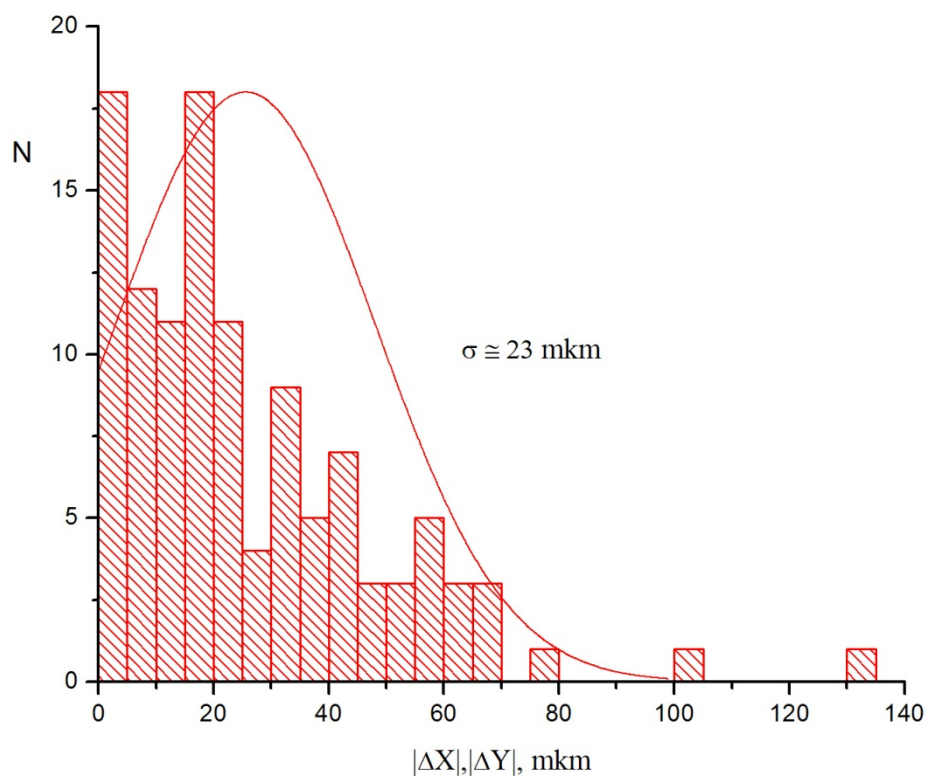


Рис.1 а

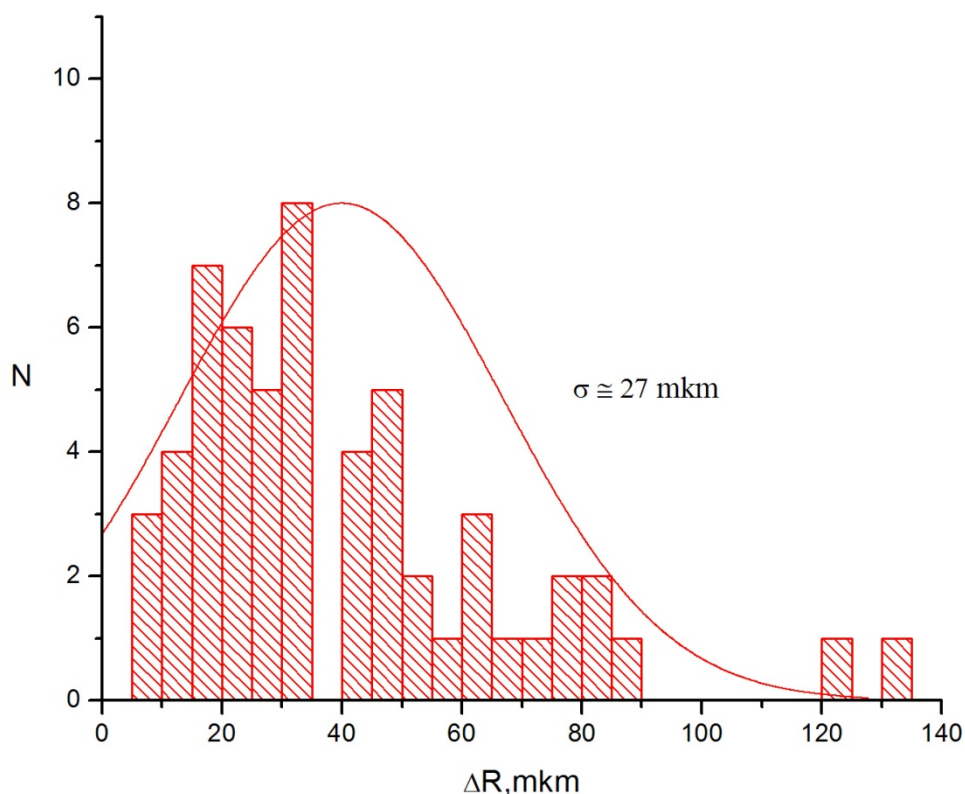


Рис.16

### Заключение.

Предложенный новый метод поиска первичных частиц, зарегистрированных в стратосферных рентгеноэмульсионных камерах, позволяет искать нуклоны и ядра первичного космического излучения с точностью до нескольких мкм. Среднеквадратичная ошибка метода составляет  $\sim 27$  мкм. Для сравнения среднеквадратичная ошибка предсказания координат первичных частиц в эксперименте RUNJOB составила  $\sim 35$  мкм. Новизна предлагаемой методики состоит в том, что система координат совмещается с проекцией трека фонового ядра, близко расположенного к исследуемому событию. Это позволяет автоматически учитывать относительные сдвиги эмульсионных пленок. По разнице между измеренными и расчетными координатами фонового вспомогательного ядра в ядерной пленке, где ищется трек первичной частицы, относительным изменениям длин проекций его трека в эмульсии и основе пле-

нок, расположенных выше и ниже вершины взаимодействия, рассчитываются координаты и длины проекций трека первичной частицы. Кроме того, поскольку фоновые ядра выбираются таким образом, чтобы их расположение было близко к первичной частице, то практически исключается ошибка, связанная с перемещением микроскопного стола.

Для решения задачи обнаружения трека однозарядной частицы в «протонных» событиях в эксперименте RUNJOB требуется дальнейшая обработка экспериментального материала.

## Литература.

1. А.В.Апанасенко и др. «Аэростатные исследования первичных космических лучей и их взаимодействий с веществом при высоких энергиях». Изв. АН СССР, сер. физ., т.53, №2, 1989г.
2. Апанасенко А.В. и др. «Центральные ядро-ядерные взаимодействия с энергией  $>1$  Тэв/нуклон, зарегистрированные в космических лучах методом стратосферных рентгено-эмульсионных камер». Изв.РАН, сер. физ., т.61, №3, 1997г.;
3. K.Asakimori et al. Cosmic Ray Proton and Helium Spectra-Results from the JACEE Experiment. 1997, LSU Space Science/Particle Astrophysics Preprint 11/3/97
4. R.J.Wilkes et al., Pr. 27<sup>th</sup> ICRC, Hamburg, 2001
5. В.И.Зацепин и др. Энергетические спектры и состав первичных космических лучей в области энергий выше 10 ТэВ на частицу. 1994, Ядерная Физика, т.57, №4, с.684-689.
6. Апанасенко А.В. и др. Исследование первичных космических лучей в эксперименте RUNJOB. Сотрудничество RUNJOB” Изв.РАН, сер. физ., т.65, №3, 2001г.;
7. Апанасенко А.В. и др. Изучение взаимодействий ядер первичного космического излучения высокой энергии с ядрами атомов свинца и железа мишеней стратосферных РЭК, Изв.РАН, сер. физ., т.58, №12, 1994г.;
8. W. Jones at al., “A cosmic ray experiment on very high energy nuclear collisions”, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci., 1987, 37.

9. A. V. Apanasenko et al., Composition and energy spectra of cosmic ray primaries in the energy range  $10^{13}$  - $10^{15}$  eV/ particle observed by Japanese-Russian joint balloon experiment. *Astropart. Phys.* 16, 13 (2001).
10. Заярная И.С. « Экспериментальная особенность в потоке первичных протонов с энергией  $> 10$  ТэВ по результатам поиска первичных частиц в ядерных эмульсиях, экспонировавшихся в стратосфере. (Эксперимент RUNJOB)», *Ядерная физика*, 2008, Vol. 71, No. 2, pp. 299–303.
11. Apanasenko A.V., Fujii M., Hareyama M. et al. (RUNJOB Collaboration), Methodology for primary cosmic ray observation in RUNJOB program --- Chamber designing and data processing. *Proc. of 25th ICRC, Durban*, 1997, v.5, p.9-12.
12. А.В.Апанасенко и др. Методика продления ядерно-электромагнитных каскадов и поиска первичных частиц в ядерных эмульсионных пленках с использованием полуавтоматической системы. 1997, Препринт ФИАН, №68.
13. А.Я. Варковицкая и др. Эмульсионный эксперимент для изучения энергетического спектра протонов и ядер первичного космического излучения в области энергий  $> 10$  ТэВ на частицу. Препринт НИИЯФ МГУ, 89-8/85.
14. Д.С.Ошуев. Методика получения спектров частиц первичного космического излучения в российско-японском эмульсионном эксперименте RUNJOB. Диссертация к.ф.-м.н., НИИЯФ МГУ, 1998.
15. В.И.Зацепин. Характеристики потока первичных космических лучей в области энергий  $\geq 10$  ТэВ на частицу. Диссертация д.ф.-м.н., НИИЯФ МГУ, 1989.
16. W.Jones at al. A cosmic-ray experiment on very high energy nuclear collisions. *Ann.Rev.Part.Sci.* 1987, 37.
17. И.С. Заярная. Экспериментальная особенность в потоке первичных протонов с энергией  $> 10$  ТэВ по результатам поиска первичных частиц в стратосферных рентгено-эмульсионных камерах. Препринт ФИАН, 2006, №8.