

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ФИЗИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ**



*имени
П. Н. Лебедева*

Ф И А Н

ПРЕПРИНТ

8

И.С. ЗАЯРНАЯ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОСОБЕННОСТЬ
В ПОТОКЕ ПЕРВИЧНЫХ ПРОТОНОВ
С ЭНЕРГИЕЙ > 10 ТэВ
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПОИСКА
ПЕРВИЧНЫХ ЧАСТИЦ В СТРАТОСФЕРНЫХ
РЕНТГЕНО-ЭМУЛЬСИОННЫХ КАМЕРАХ.**

МОСКВА 2006

Abstract.

In the preprint the events have been got in balloon experiments (FIAN, RUNJOB) with long duration exposition of X-ray emulsion chamber in stratosphere are presented. Using statistics of experimental data treatment from RUNJOB-VI-A and RUNJOB-XI-(A,B) we have 50% of events from proton group, for which primary track is absent in search circle with radius 3σ , where σ is statistical error of primary particle location. Methodic reasons presented in this paper do not explain this experimental result.

Введение.

Баллонные эксперименты с длительным экспонированием ($\sim 6\div 7$ суток) рентгено-эмульсионных камер (РЭК) в стратосфере проводились в ФИАН с 1975 года по 1993 год. Основной задачей научных исследований этих экспериментов являлось изучение характеристик нуклон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий первичных космических частиц при энергиях > 1 ТэВ/нуклон. Для анализа отбирались события с наибольшей энергией и множественностью вторичных частиц. Накопленный экспериментальный материал включает более 200 взаимодействий нуклонов и ядер первичного космического излучения с ядрами углерода, железа и свинца мишенных слоев РЭК. Для этих событий, среди которых 10 взаимодействий со средней множественностью вторичных заряженных частиц ~ 600 , определялся заряд налетающей частицы, зенитный (θ) и азимутальный (φ) углы вторичных заряженных частиц, их множественность, энергия первичной частицы. Опыт, накопленный экспериментальной группой ФИАН при работе с РЭК под руководством Апанасенко А.В., был использован в российско-японском эксперименте RUNJOB в решении другой научной задачи – определении состава и спектров первичных космических лучей в области энергий 10-1000 ТэВ методом стратосферных рентгено-эмульсионных камер. В эксперименте RUNJOB двусторонние ядерные эмульсионные пленки японского производства экспонировались на высоте ~ 32 км на российских аэростатах по той же трассе Камчатка - Вольск, что и РЭК ФИАН. В RUNJOB с 1995 года по 1999 год было проведено 10 успешных длительных полетов. Общая статистика событий, использованная для представления окончательных результатов российско-японского эксперимента, составляет 521 событие, из которых 360 – это взаимодействия первичных протонов. Измерительный комплекс, который применялся в RUNJOB- микроскоп с большим увеличением и автоматически движущимся предметным столом–ССД камера-компьютер, позволил искать первичные частицы с высокой точностью ($\sigma \sim 10$ мкм). Среди событий, отнесенных к протонной группе, в эксперименте RUNJOB оказалось $\sim 50\%$ процентов таких, в которых кандидат на

трек первичной частицы в области поиска с радиусом около 3σ , не был обнаружен. В данной работе делается попытка разобраться с этой особенностью на основе анализа методов продления и поиска треков релятивистских однозарядных частиц в эмульсионных слоях РЭК в баллонных экспериментах.

Конструкция камер.

Для исследования спектров и состава первичных космических частиц, а также нуклон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий при энергиях $> 1\text{ТэВ/нуклон}$ в экспериментах RUNJOB и ФИАН применялись РЭК сложных конструкций, примеры которых представлены на рис.1 и рис.2.

Структура камер представляет собой стопку слоев, каждый размером $\sim 40 \times 50$ см. Детекторами в камерах являются ядерные эмульсионные пленки, которые чередуются с пластинами: а) мишеней (Fe, Pb, C), б) пенопласта и с) пластинами свинца в нижней части камер, где регистрируются электронно-фотонные каскады из взаимодействий первичных космических частиц с веществом камеры.

Средняя высота мишенных блоков в единицах ядерного пробега взаимодействия протонов в обоих экспериментах составляла ~ 0.17 ед. Расстояние между ядерными эмульсиями, расположенных в мишенной части камер,

изменялось от ~ 1 мм до ~ 7 мм. Высота калориметра в каскадных единицах в РЭК ФИАН изменялась от 1.8 до 9.5, в RUNJOB – от 3.6 до 5.17 т-ед.. Нуклоны и ядра первичного космического излучения, попадая в рентгено-эмульсионную камеру, взаимодействовали с веществом мишени, образуя струю вторичных частиц, состоящую, в основном, из π^\pm , π^0 мезонов. Нейтральные пионы давали начало электрон-фотонным каскадам (ЭФК), которые регистрировались в рентгеновских пленках калориметра в виде пятен почернения. За время экспозиции 6-7 суток на нижней рентгеновской пленке невооруженным глазом выделялось более 500 пятен. Используя различные критерии

отбора (по зенитному углу, суммарной энергии, выделившейся в нейтральную компоненту и т.д.) события продлевались снизу вверх до вершины взаимодействия.

Затем осуществлялся поиск первичной частицы, инициировавшей взаимодействие, и дальнейший анализ по определению ее энергии.

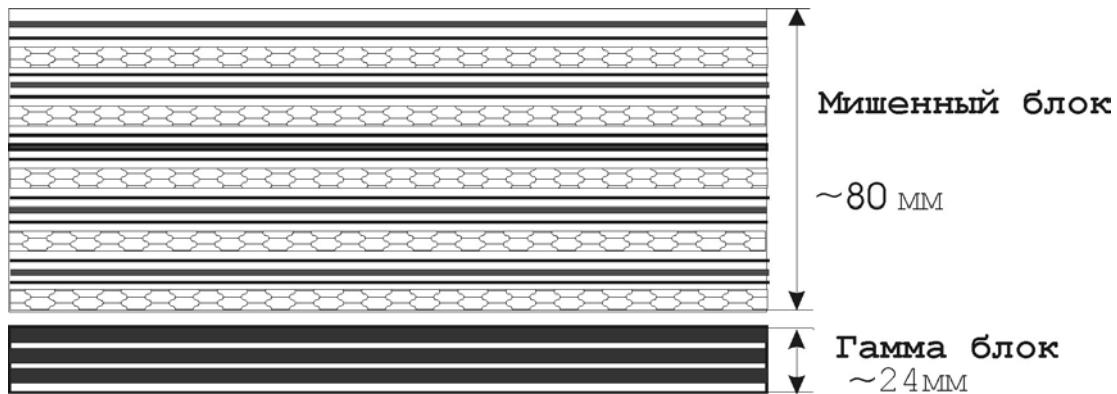


Рис.1 Структура РЭК 9124 (ФИАН)

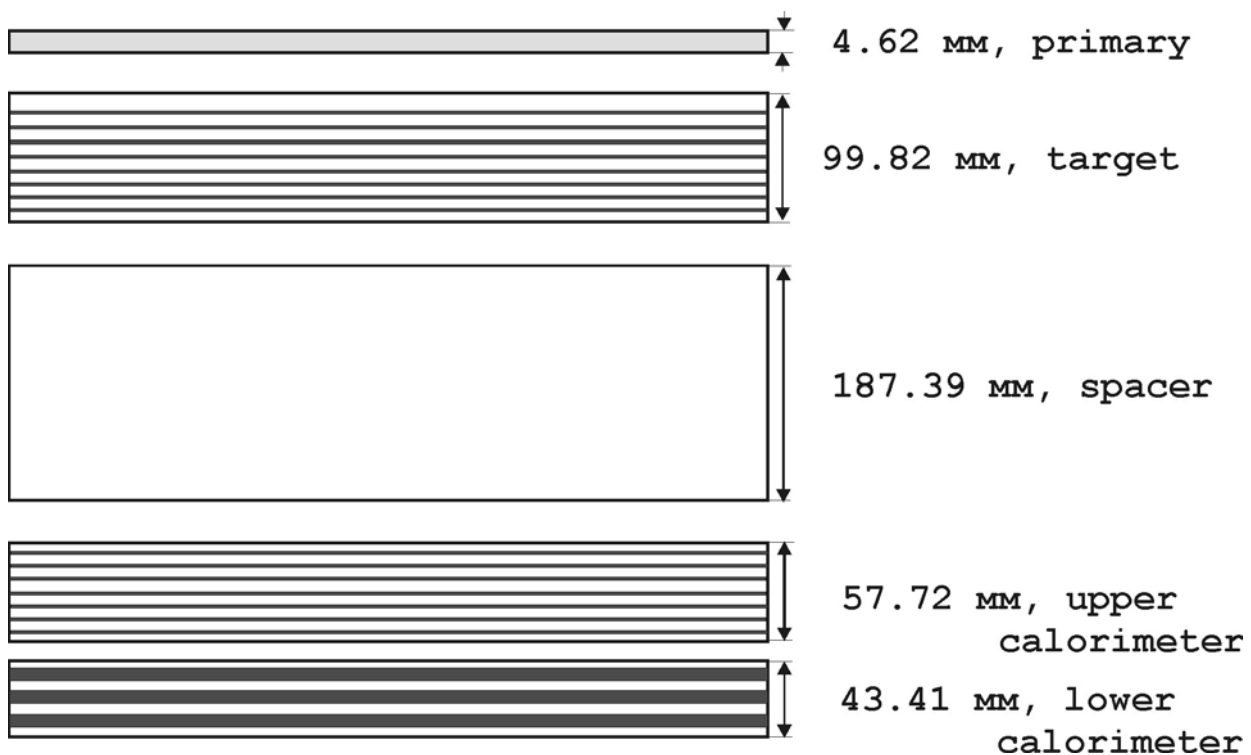


Рис.2 Структура РЭК RUNJOB`95

Поиск и прослеживание событий.

Поиск взаимодействий начинался с прослеживания ЭФК из слоя в слой в рентгеновских пленках, где каскады видны невооруженным глазом, снизу в вверх камеры. Обнаруженные в рентгеновских пленках ЭФК находились затем в соответствующих листах ядерных эмульсий, расположенных сразу под рентгеновскими пленками. Когда плотность частиц в каскаде становилась недостаточной для создания заметного пятна почернения в рентгеновских пленках, дальнейшее продление производилось в ядерных эмульсиях под микроскопом с увеличением $10^x \times 10^x$ или $15^x \times 20^x$. Струя вторичных частиц прослеживалась из слоя в слой эмульсии до уровня, выше которого в пластине мишени находилась точка взаимодействия. В пленке, расположенной над этой пластиной, искался трек первичной частицы с зенитным - θ и азимутальным - ϕ углами, такими же, как у частиц в струе и ЭФК.

Подробно методика поиска взаимодействий в РЭК экспериментов ФИАН и RUNJOB описана в работах [1,2].

Поиск первичной частицы.

Это один из наиболее важных этапов обработки экспериментального материала, поскольку от его результата зависит определение состава и спектров отдельных компонент первичного космического излучения. Различными техническими средствами, но применяя один и тот же метод сшивки слоев ядерной эмульсии по близко расположенным трекам фоновых ядер [1,2], в рассматриваемых экспериментах область поиска первичной частицы удалось уменьшить до круга радиусом в несколько десятков мкм (см. рис.3).

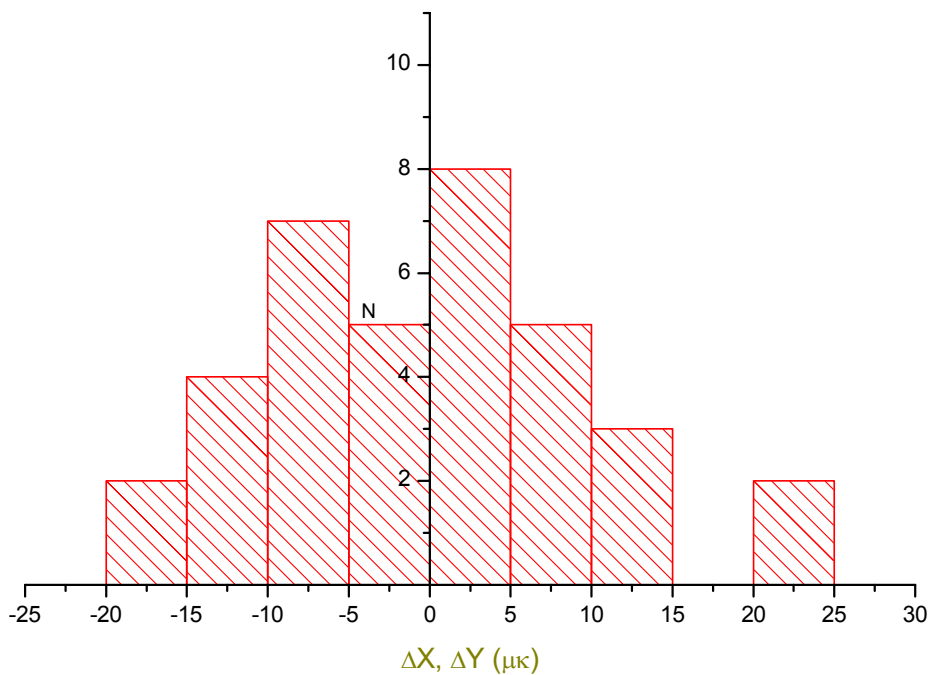
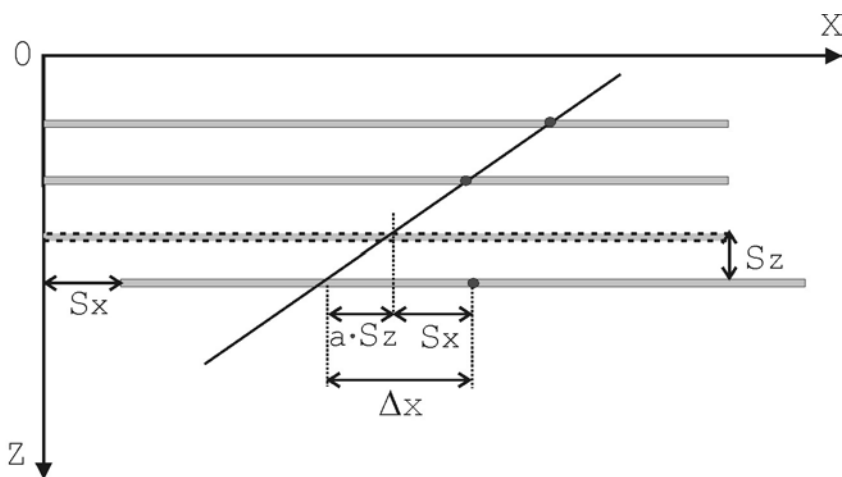


Рис.3 Распределение отклонений $\Delta X, \Delta Y$ ($\mu\text{м}$) измеренных от предсказанных координат треков фоновых ядер и исследуемого каскада по трем эмульсионным пленкам для события №941-10.

Суть метода состоит в том, что для более точного предсказания местоположения первичной частицы измеряются координаты фоновых ядер (2-5 многозарядные частицы) близко расположенных (в круге радиусом ~ 1 см) к исследуемому каскаду на двух-трех пленках ниже мишенного слоя, где произошло взаимодействие, и в пленке, расположенной над вершиной взаимодействия, а также измеряются координаты струи вторичных частиц на пленках ниже точки взаимодействия. По этим измерениям определяются смещения пленок относительно друг друга. В эксперименте ФИАН использовалась система уравнений (1), где неизвестные величины смещений (Sx_k, Sy_k, Sz_k) эмульсионных пластин как в плоскости, так и по вертикали определялись из графиков корреляций (2) методом наименьших квадратов [4]. По этим смещениям определялась точность предсказания координат первичной частицы.



$$\Delta X_{kj} = Sx_k + a_{xj} * Sz_k + \delta x$$

$$\Delta Y_{kj} = Sy_k + a_{yj} * Sz_k + \delta y, \quad (1)$$

где ΔX_{kj} , ΔY_{kj} - отклонения реально измеренных координат j -ой частицы на k -ом слое от предсказанных координат. Sx_k , Sy_k , Sz_k - смещения k -ой пленки по (Ox), (Oy), (Oz), a_{xj} , a_{yj} - тангенс угла наклона j -ой частицы к оси (Oz), δx , δy - случайные ошибки измерений.

$$a_{xj} = f(\Delta X_{kj}), \quad a_{yj} = f(\Delta Y_{kj}) \quad (2)$$

Требования к точности предсказания в несколько десятков мкм возникли при поиске первичных протонов и α -частиц, поскольку при длительной - порядка 150 часов экспозиции РЭК в стратосфере, загрузка ядерных эмульсий треками частиц с энергией выше порога обрезания (> 4 ГВ) очень велика. Экспериментально получено, что на площадь 100×100 мкм² при этой экспозиции приходится $50 \div 70$ треков частиц разной длины и направления. Поскольку пространственное разрешение ядерных эмульсий одно из самых высоких: две релятивистские однозарядные частицы надежно различаются на расстоянии 1 мкм, то на вышеуказанном фоне треки однозарядных частиц выделяются всегда, за исключением тех случаев, когда есть локальные повреждения ядерной эмульсии. Это подтверждается измерениями углов вторичных заряженных частиц (в основном пионов) из взаимодействий частиц первичного космического излучения в рентгено-эмульсионных камерах, когда вторичные частицы прослеживались в нескольких

ядерных пленках на расстояния до нескольких сантиметров от вершины взаимодействия. Точность измерения углов составляла 10^{-4} радиан. В Таблице 1 указаны примеры событий, в которых определялись зенитные и азимутальные углы вторичных частиц [7,8].

Таблица 1.

№ события	Тип взаимодействия	Зенитный угол θ° первич. частицы	Множ-ность вторич. заряж. частиц - N_{ch}	Энергия заряж. комп-ы - ΣE_{ch} (ТэВ)	Энергия нейтр. комп-ы ΣE_{γ} (ТэВ)	Энергия первич. частицы - E_0 (ТэВ)
892304 (ФИАН)	Mg + Pb	57 ⁰	1021	150	50	200
913281 (ФИАН)	O + Fe	43 ⁰	450	50	30	80
913264 (ФИАН)	Li + Pb	26 ⁰	290	40	20	60
40 (RUNJOB-IA)	α + C	11 ⁰	79		3.4	9.5
45 (RUNJOB-IA)	Mg + C	27 ⁰	55	5.3		8.2

По сравнению с RUNJOB в баллонном эксперименте ФИАН событий, в которых измерялись углы вторичных частиц, было намного больше, так как в этом экспе-

рименте исследовались характеристики нуклон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий. Таким образом, в ядерных эмульсиях двух экспериментов, обладающих приблизительно одинаковой чувствительностью (не менее 40 блобов на длине следа 100 мкм однозарядной релятивистской частицы), однозарядные частицы высокой энергии выделяются на фоне различных следов, которые набирает ядерная пленка при длительной экспозиции.

В самом деле, для надежного выделения из фона искомого события необходимо выполнение следующего критерия [5]:

$N_{\phi} \Delta S \Delta \Omega \ll 1$, где N_{ϕ} - число фоновых событий за время экспозиции детектора $T_{\text{эксп}}$ в единице телесного угла (стер) и на единице площади (см^2) детектора, ΔS – точность искомой площадки, $\Delta \Omega = \sin \theta \Delta \theta \Delta \varphi$ -телесный угол определяемый точностями зенитного ($\Delta \theta$) и азимутального ($\Delta \varphi$) углов.

В баллонных эмульсионных экспериментах фоновым событием для искомого трека первичной частицы, инициировавшей ядерно-электро-магнитный каскад, является трек фоновой первичной частицы с энергией выше геомагнитного порога обрезания или трек вторичной частицы, образованный при взаимодействии первичной с веществом остаточной атмосферы или с веществом РЭК. Зенитный и азимутальный углы первичной и фоновой частиц должны совпадать в пределах ошибки измерения.

Среднее число фоновых треков- N_{ϕ} в эмульсии в интервале зенитных углов $\theta \in [0^{\circ}, 180^{\circ}]$ и азимутальных $\varphi \in [0^{\circ}, 360^{\circ}]$ на площади $\Delta S = 10^4 \text{ мкм}^2$ за время экспозиции РЭК $T_{\text{эксп}} \sim 150$ часов составляет 70 треков, тогда число фоновых частиц в телесном угле $\Delta \Omega = \sin \theta \Delta \theta \Delta \varphi$ часов, где $\Delta \theta, \Delta \varphi$ -точности соответствующих углов, составит

$$N_{\phi} \Delta S T_{\text{эксп}} \Delta \Omega = 70 \times (\pi/60) \times (\pi/60) \sin \theta / 4\pi < 1.$$

Число кандидатов на трек первичной частицы в эмульсии зависит от площади поиска и длительности экспонирования РЭК. В рентгено-эмульсионных экспе-

риментах использовался ряд критериев, позволяющий надежно идентифицировать из фона трек искомой первичной частицы:

1. Отклонение измеренного значения азимутального и зенитного углов частицы не должно превышать 3° .
2. Ионизация, производимая частицей, на всех рассматриваемых слоях примерно одинакова.
3. Не должно быть систематического отклонения траектории движения частицы-кандидата за пределы точности, рассчитанной траектории ядерно-электромагнитного каскада (частица-кандидат прослеживается в нескольких вышележащих слоях над вершиной взаимодействия).
4. В слоях, где уже виден ливень, частица-кандидат должна отсутствовать.

Область поиска первичной частицы - это круг с центром в точке предсказания и радиусом около 3σ , где σ - ошибка в определении координат местоположения первичной. В экспериментах с длительным экспонированием РЭК точность $\sigma \sim 100 \div 200$ мкм была достаточной для идентификации первичных ядер с $Z \geq 6$, но такая точность сильно затрудняет выделение из фона малозарядных частиц (p, α). При уменьшении ошибки предсказания местоположения первичного трека до $\sigma \sim 20 \div 50$ мкм однозначно идентифицируются ядра гелия. При дальнейшем уменьшении области поиска ($R < 60$ мкм, $\sigma < 20$ мкм) из фона можно выделить трек первичного протона.

Результаты поиска первичных протонов в экспериментальных событиях.

В данной работе представлены результаты поиска первичных частиц для событий из камер RUNJOB- VIA и RUNJOB- XI(A,B) с зенитным углом $\text{tg}(\theta) < 5$ и порогом по энергии, выделенной в электро-магнитную компоненту, $\Sigma E_\gamma > 3$ ТэВ и

$\Sigma E_\gamma > 5$ ТэВ соответственно. Площадь каждой камеры составляла 0.2 м^2 , время экспозиции 139.5 часов и 146 часов. Точность предсказания местоположения первичной частицы для индивидуальных событий составляла величину от нескольких мкм до 250 мкм. Ошибка предсказания связана в первую очередь с углом падения первичной частицы, а также с точностью измерения координат оси вторичных частиц генетически связанной с первичной. При $\text{tg } \theta \leq 1$ $\sigma \cong 30$ мкм, при $\text{tg } \theta > 1.7$ $\sigma \cong 95$ мкм.

На рис. 4 показано распределение отклонений измеренных координат треков первичных частиц от предсказанных ΔR .

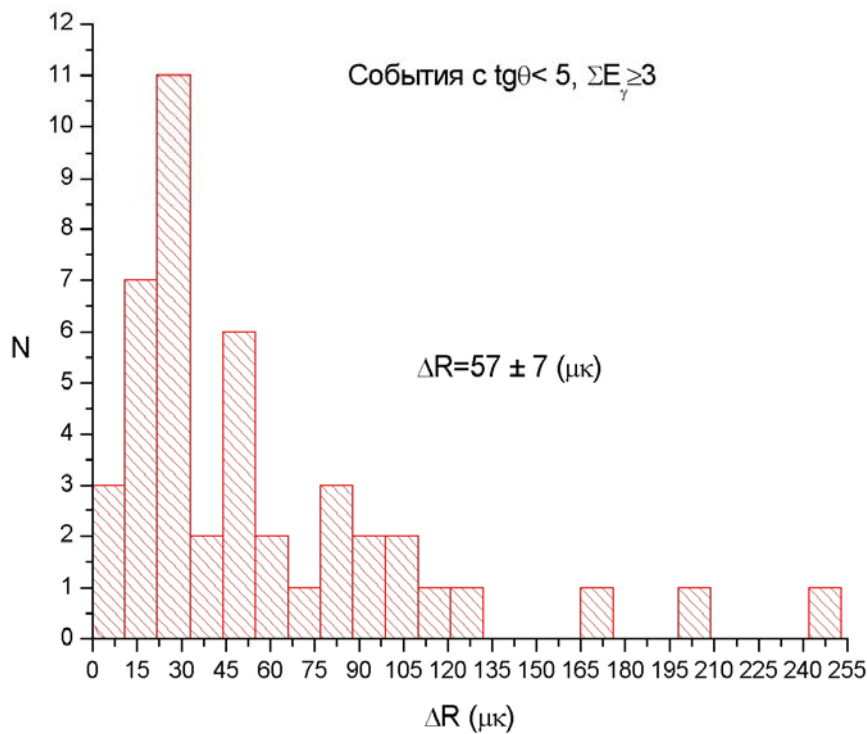


Рис.4

Среднее значение отклонений для нуклонов и ядер равно $\langle \Delta R \rangle = 57$ мкм. Для сравнения можно отметить, что точность предсказания местоположения первичной частицы в других экспериментах MUBEE, JACEE со стратосферными рентгено-эмульсионными камерами (РЭК) составляла ~ 200 мкм, ~ 10 мкм соот-

ветственно [8,9]. При поиске первичных частиц в баллонных экспериментах ФИАН и RUNJOB считалось, что если в области предсказания с $R \sim 60 \div 150$ мкм не было кандидата на первичную частицу с $Z \geq 2$, инициировавшую ядерно-электромагнитный каскад, то в этой области должен быть протон (или вторичная однозарядная, нейтральная частица, образованная в результате взаимодействия первичной в остаточной атмосфере). Аналогичный подход был, например, в MUBEE. В длительных стратосферных полетах с РЭК локальная точность первичной частицы ~ 10 мкм должна была обеспечить идентификацию протонов. На практике по данным обработки камер RUNJOB- VIA и RUNJOB- XIA,B в результате поиска первичных частиц 21 высокоэнергичное событие было отнесено к протонному. Только для 10 из этих событий трек первичной однозарядной частицы был найден, для остальных 11 событий в круге поиска кандидат на трек первичной частицы отсутствовал, т.е. для $\approx 50\%$ событий природа первичной частицы не ясна.

Обсуждение.

Какие могли бы быть причины того, что в круге поиска не обнаружен кандидат на трек первичной однозарядной частицы? Рассмотрим возможные методические причины.

Во-первых, большой фон частиц, затрудняющий обнаружение однозарядных треков. Однако по измерениям вторичных заряженных частиц, в большинстве своем однозарядных, из найденных взаимодействий, в эмульсиях с длительной экспозицией вторичные мезоны однозначно прослеживаются несколько слоев, т.е. набранный фон частиц при такой экспозиции практически не влияет на идентификацию однозарядных частиц.

Во-вторых, возможна случайная ошибка измерений, т.е. искомая частица находится за кругом предполагаемого поиска.

Для того чтобы убедиться в этой причине, достаточно было бы продлить найденный трек протона на вышележащий слой. Тогда, если приблизительно в та-

ком же количестве не наблюдаются протоны на втором слое, как и на первом, то можно заключить, что случайная ошибка измерения является причиной не нахождения трека протона. По данным поиска первичных частиц из камеры RUNJOB- IIIВ, из найденных протонов только 30% не обнаружены на вышележащих втором и третьем слоях, т.е. случайная ошибка измерений не объясняет 50% ненайденных треков однозарядных частиц в камерах RUNJOB- VIA и RUNJOB- XI(A,B).

К физическим причинам наблюдаемого результата поиска первичной однозарядной частицы можно отнести нейтральную компоненту космического излучения на уровне экспонирования рентгено-эмульсионной камеры.

Если предположить, что это нейтроны, то трудно объяснить такое их количество, т.к. по расчетам относительное содержание высоко энергичных нейтронов в атмосфере на высоте ~ 30 км мало. В работе [10] по проведенным расчетам в атмосфере на глубине $\sim 10 \text{ г/см}^2$ вклад нейтронов в общий поток вторичных космических частиц с энергией > 20 ТэВ, в интервале углов 0° - 70° составляет 4%. В баллонном эксперименте ФИАН при точности предсказания координат первичной частицы ~ 30 мкм также были события, для которых трек первичной частицы не был найден.

Заключение.

При поиске первичных частиц с энергией > 10 ТэВ/нуклон, взаимодействовавших в рентгено-эмульсионных камерах VI-A и XI-A,B в эксперименте RUNJOB, обнаружилось, что около 50% процентов событий, отнесенных к протонной группе, не имеют кандидата на трек однозарядной релятивистской частицы в круге поиска. В данной работе использовалась только небольшая часть общей статистики «протонных» взаимодействий эксперимента RUNJOB. Однако, можно учесть статистику в публикации [2] с анализом данных по экспозиции камер RUNJOB95', RUNJOB96', где указано, что только для 50% протонных

взаимодействий были идентифицированы треки первичных частиц. Отсутствие кандидата на первичную частицу нельзя объяснить большой загруженностью эмульсий фоновыми частицами при длительной экспозиции РЭК, поскольку однозарядные вторичные частицы из взаимодействий, найденных в баллонных экспериментах, прослеживаются несколько ядерно-эмульсионных слоев. Подтвердить этот вывод можно было бы также сравнением результатов поиска первичных частиц в длительных и коротких полетах РЭК. Опираясь на расчеты прохождения первичного космического излучения через остаточную атмосферу, нельзя утверждать, что около 50% событий с не найденными первичными частицами - это взаимодействия нейтронов. Если предположить, что эти взаимодействия вызваны нейтральными частицами, то поток протонов при энергиях >10 ТэВ включает в себя значительную часть нейтральной компоненты. Для окончательного вывода о составе протонной группы событий требуется дальнейший анализ экспериментального материала и, возможно, будущие эксперименты.

Литература.

1. 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.
2. 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 . *Astroparticle Phys.* 16(2001), p.p.13-46.
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. Y.Olejnickak, M.Walczak. Track localization in multi-layer emulsion chamber,1988, Proc.5th Int.Symp. on Very High Energy C.R.Interaction,p.271

5. Н.Л.Григоров и др. Частицы высоких энергий в космических лучах. 1973, Изд. «Наука».
6. А.В.Апанасенко и др. Об области генерации вторичных пионов во взаимодействиях адрон-ядро и ядро-ядро с энергией ≥ 25 ТэВ, зарегистрированных с помощью стратосферных РЭК. 1991, Изв.АН,сер.физ.,т.55, №4, р.648.
7. А.В.Апанасенко и др. Методы определения энергии взаимодействий в рентгено-эмульсионных камерах. 1999, Препринт ФИАН, №72
8. 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.
9. Y.Kawamura et al. "Quasidirect" observations of cosmic-ray primaries in the energy region $10^{12} - 10^{14}$ eV.1989, Phys.Rev.D, V.40, N3, p.p.729-751.
10. В.А.Березовская и др. Моделирование энергетических спектров различных первичных ядер в атмосфере на глубине $10 \text{ г}\text{см}^2$.