

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки**  
**Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН**

**Тан Найнг Со**

**«Облученные космическими лучами метеоритные оливнины  
как инструмент поиска сверхтяжелых элементов в природе»**

Доклад по диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Специальность: 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Научный консультант:  
доктор физико-математических наук  
**Старков Н.И.**

Москва -2022 г.

# План доклада

I. Общая характеристика работы

II. Введение.

III. Эксперимент ОЛИМПИЯ

IV. Особые случаи в эксперименте ОЛИМПИЯ при анализе треков из метеоритов

V. Анализ характеристик высокочувствительной ядерной фотоэмульсии для разработки оптимальной технологии ее изготовления.

VI. Результаты работы

VII. Публикации

VIII. Апробация работы

# **I. Общая характеристика работы**

## **АКТУАЛЬНОСТЬ**

Настоящая работа связана с актуальными задачами современной физики, решаемыми на основе использования трековых детекторов. В частности, в ней детально описывается реализуемый автором в составе фиановской группы эксперимент по поиску сверхтяжелых элементов в природе - треков ядер в оливинах из метеоритов. В работе изложена оригинальная методика работы с оливинами, представлены результаты исследования в виде зарядового распределения ядер космических лучей. Разработанные авторские методики работы с трековыми детекторами (в том числе, с ядерной фотоэмульсией) успешно применяются также в исследованиях на ускорителях элементарных частиц - в международных экспериментах по поиску явлений Новой физики - SHiP и NEWSdm.

**Целью диссертационной работы является поиск и идентификация тяжёлых и сверхтяжёлых ядер космических лучей в оливинах из метеоритов.**

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие основные задачи:

- Поиск и идентификация тяжёлых и сверхтяжёлых ядер космических лучей в оливинах из метеоритов.
- Разработка алгоритмов и создание программ на языке C++ для автоматизированного анализа и идентификации следов частиц в трековых детекторах.
- Построение зарядового спектра, исследование его особенностей.
- Исследование влияния отжига треков на зарядовый спектр ядер космических лучей по результатам измерений в оливинах из метеоритов.
- Анализ возможных причин возникновения треков особой формы.
- Анализ фрагментации сверхтяжёлых ядер при их прохождении через вещество метеорита.
- Изучение особенностей треков ядер в метеорите Сеймчан.
- Адаптация созданного программного обеспечения для обработки данных трековых детекторов с целью анализа характеристик высокочувствительной ядерной фотоэмульсии.

## Научная новизна работы

Научная новизна работы проделанной работы заключается в следующем:

- Создана уникальная, не имеющая аналогов, база экспериментальных данных о зарядовом составе космических лучей, включающая около 26000 треков ядер с  $Z > 40$ .
- Разработаны алгоритмы и созданы программы на языке C++ для успешно реализованного автоматизированного анализа и идентификации следов частиц в трековых детекторах.
- Выполнены оценки распределений вторичных частиц, возникающих при прохождении через метеорит тяжелых ионов и оценки влияния фрагментации ионов на зарядовый спектр на основе расчетных моделей, разработанных на базе программного пакета Geant4.
- Разработана программа на языке C++ для демонстрации влияния отжига треков на зарядовый спектр ядер космических лучей.

## Личный вклад

Все используемые в диссертации экспериментальные результаты были получены автором лично или при его определяющем непосредственном участии. Автором были найдены и идентифицированы около 26000 треков ядер с  $Z > 40$ . Автором разработаны алгоритмы и создана программа на языке C++ для автоматизированного анализа и идентификации следов частиц в трековых детекторах, создана программа вычисления толщины срезаемого слоя оливина при определении зарядов космических ядер, реализован алгоритм оценки влияния отжига треков на зарядовый спектр ядер космических лучей. На основе пакета Geant4 автором были построены модели используемых детекторов и успешно выполнено моделирование для анализа возможных причин возникновения треков особой формы. Автор успешно использовал свой опыт и созданные программные комплексы для международных проектов SHiP (Search for hidden particle) в ЦЕРНе, Женева, Швейцария и NEWSdm (Nuclear emulsion for WIMP search –directional measurement) в Национальной лаборатории Гран-Сассо Национального института ядерной физики (LNGS, INFN), Италия.

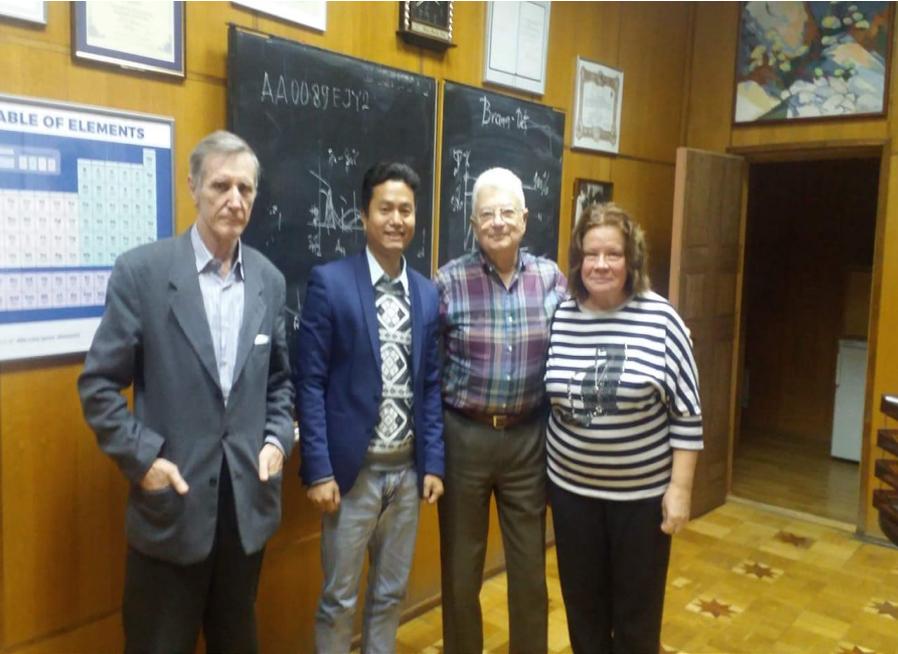
## **Основные положения, выносимые автором на защиту:**

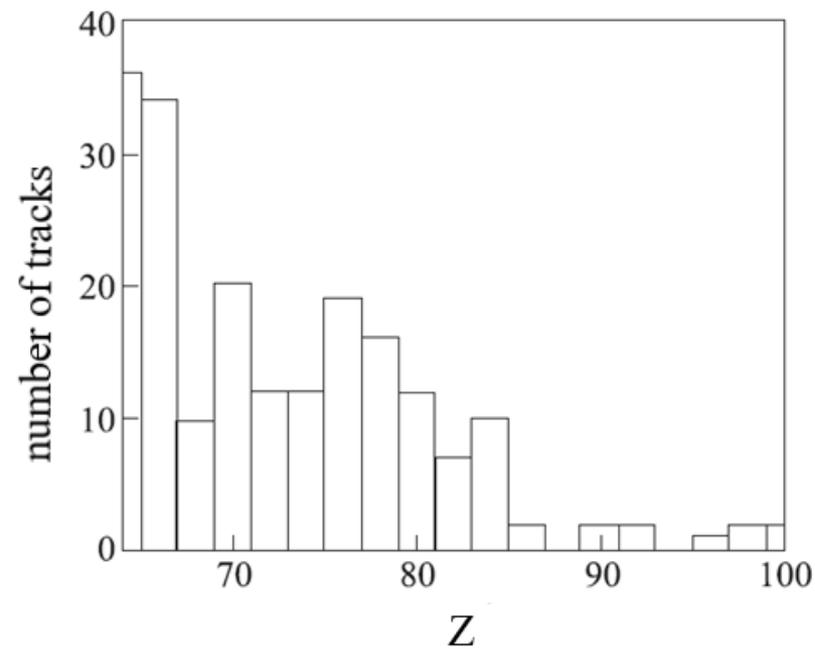
1. Получены данные о зарядовом составе около 26000 ядер космических лучей с зарядом  $>40$ , в том числе более 22000 с  $Z>55$ , которые согласуются с данными других экспериментов. Обнаружены три ядра космических лучей с зарядом  $119_{-6}^{+10}$
2. Разработана новая методика исследования характеристик треков ядер космического излучения в полном объеме кристаллов оливина из метеоритов (включая процедуры травления, автоматизированные алгоритмы измерения и анализа).
3. Выполнены модельные расчеты прохождения тяжелых ядер через оливин, проведен анализ фрагментации сверхтяжелых ядер при их прохождении через вещество метеорита. По калибровочным измерениям подтверждена правильность модельных расчетов и измерений.
4. Исследовано влияние отжига треков на зарядовый спектр ядер космических лучей и проведен анализ возможных причин возникновения треков особой формы в оливинах.

# **II. Введение**

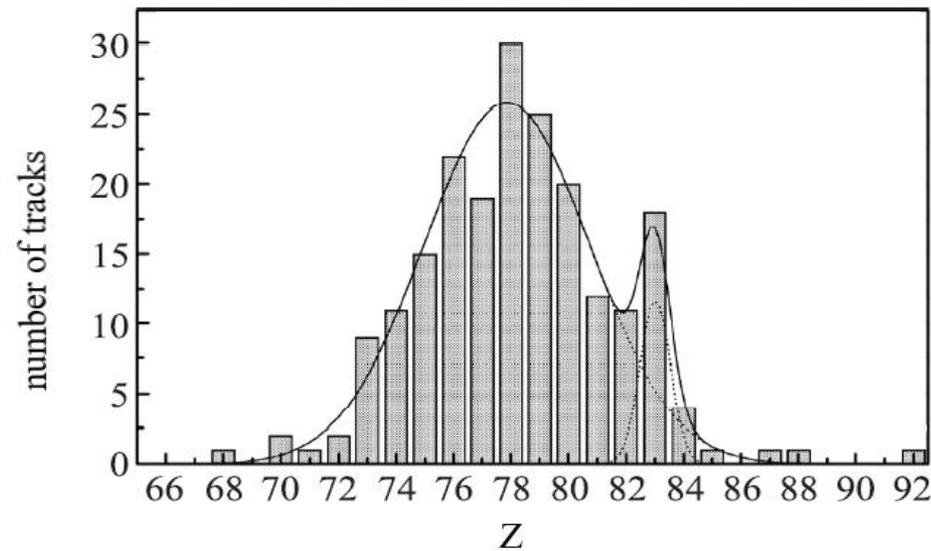
# Космические лучи, тяжелые и сверхтяжелые элементы в космических лучах

- Космические лучи — элементарные частицы и ядра, движущиеся в космическом пространстве.
- Особую роль в астрофизике играет изучение ядерной компоненты космических лучей.
- Тяжёлые и сверхтяжёлые ядра рождаются в недрах звёзд, а наиболее тяжёлые в особых экстремальных условиях типа взрыва сверхновых и слияния нейтронных звёзд. Они несут информацию об этих процессах и помогают более детально их понять.
- Одной из актуальных задач физики XXI века по мнению В.Л. Гинзбурга был поиск сверхтяжёлых, трансфермиевых ядер в природе. Существование области “острова стабильности” сверхтяжелых ядер предсказывается в ряде моделей ядра. Синтез трансфермиевых ядер в настоящее время ведётся в Лаборатории ядерных реакций (ОИЯИ) под руководством академика Ю.Ц. Оганесяна - синтезированы ядра с зарядами от 112 до 118.

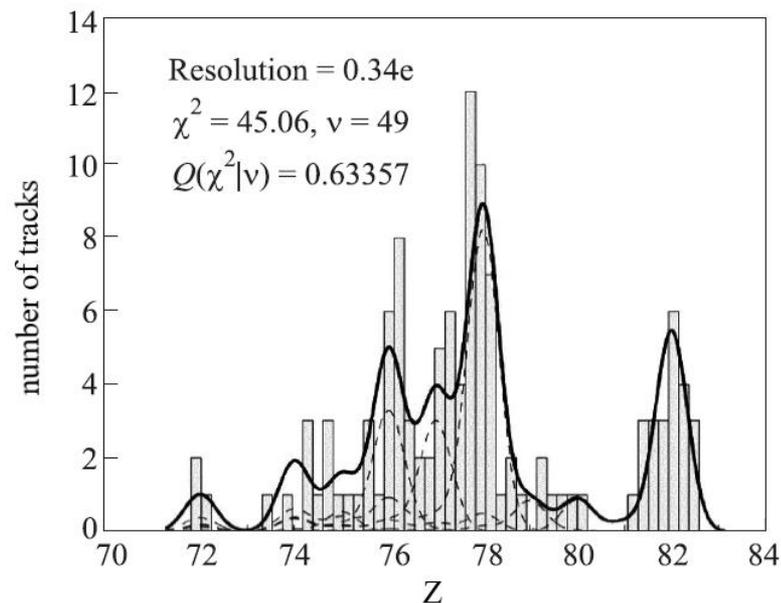




**Skylab**, 1978г,  $Z \geq 65$  Спутник,  
430км, 230 дней, пластик  
(стопки лексана).



**UHCRE**, 1995г,  $Z \geq 68$ , спутник, 450км, ~6  
лет, пластик (стопки лексана).

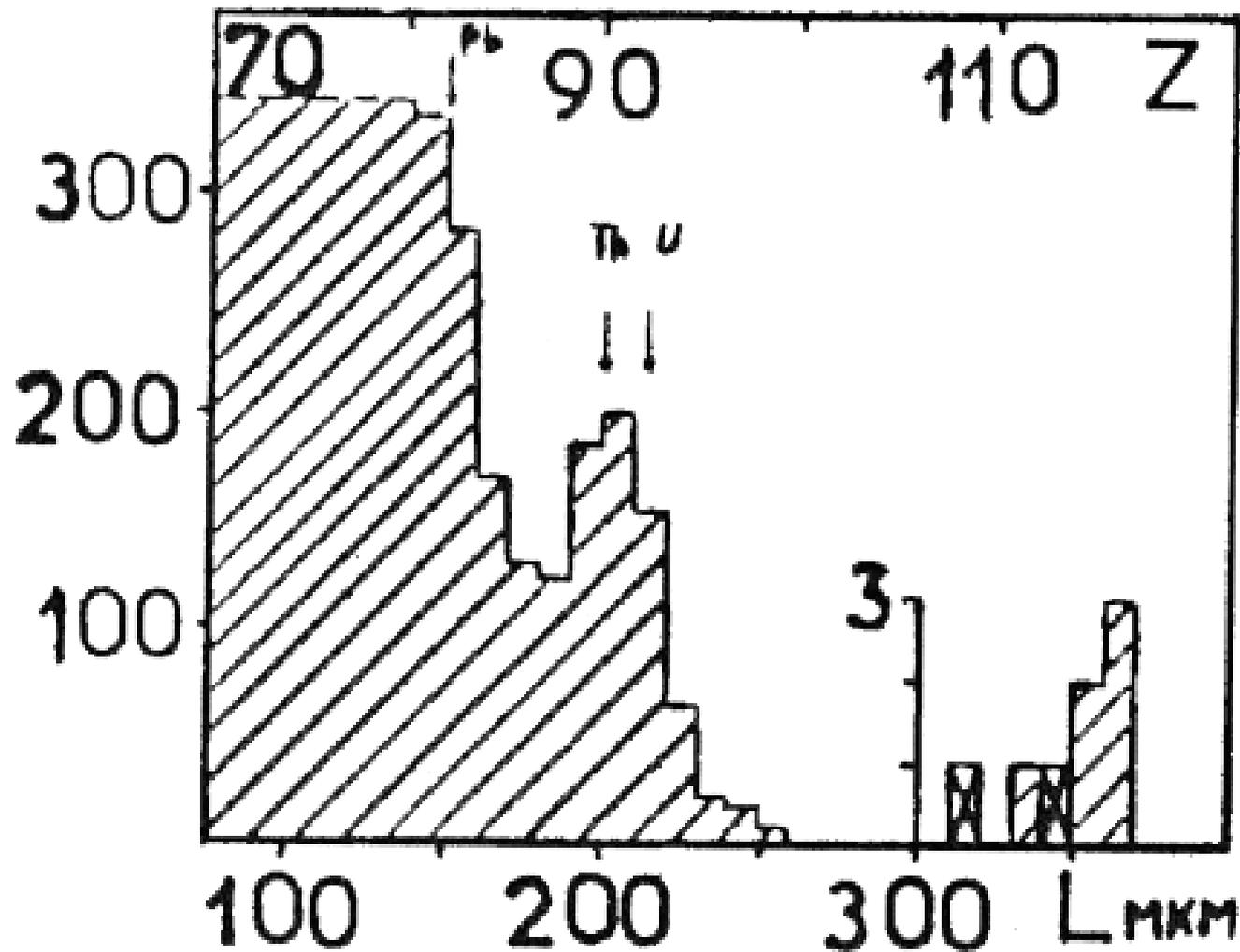


**Trek**. Станция Мир,  
5 лет, 430км, стопки  
стекол.

## Метеориты как природные детекторы.

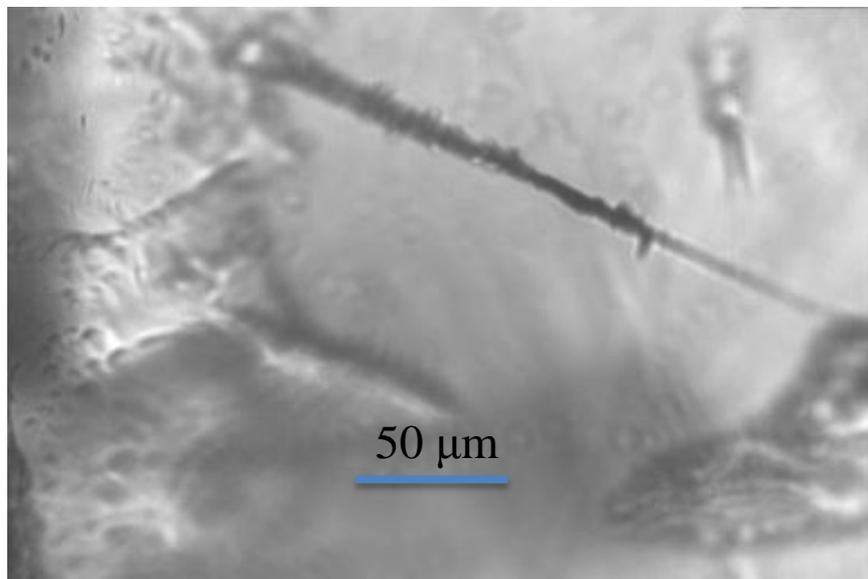
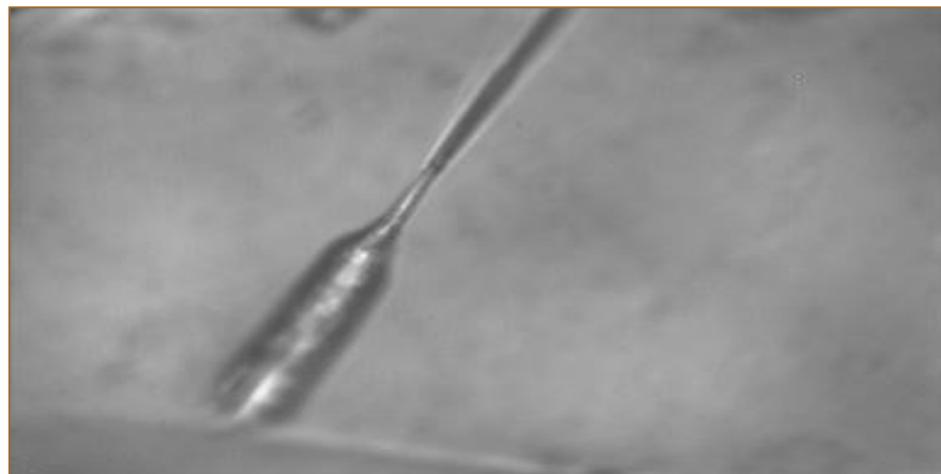
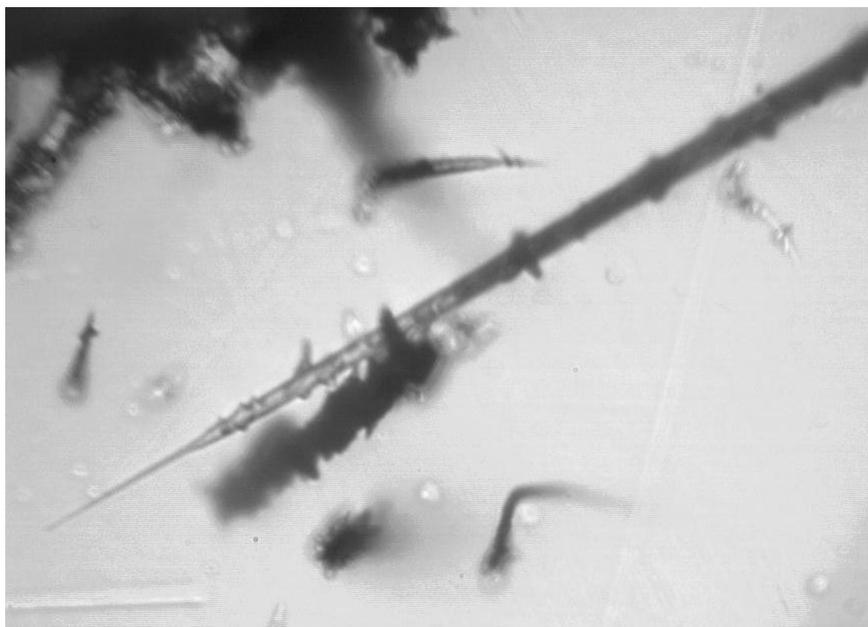
- Большим преимуществом метеоритов при их использовании в качестве детекторов космических ядер является огромное время экспозиции - сотни миллионов лет. Все это время они подвергаются облучению космическими лучами, в том числе тяжёлыми и сверхтяжёлыми ядрами.
- Для исследования треков космических ядер на оптическом микроскопе больше всего подходят палласиты, в которых содержатся кристаллы оливина – полупрозрачного минерала.
- В месте прохождения ядра через оливин возникают треки- области повреждений, обладающие повышенной скоростью травления по сравнению с неповреждёнными областями.
- В результате после травления специальными химическими растворами – травителями, в оливине возникает полый канал, повторяющий траекторию движения ядра и видимый в оптический микроскоп. Геометрические и динамические характеристики протравленного канала связаны с зарядом ядра.

В.П. Перелыгин, С.Г. Стеценко, Г.Н. Флёров; 1985.



В. П. Перелыгиным в оливине были найдены события с зарядом в области  $Z_4 > 110$

# Несколько примеров протравленных треков



## III. Эксперимент ОЛИМПИА

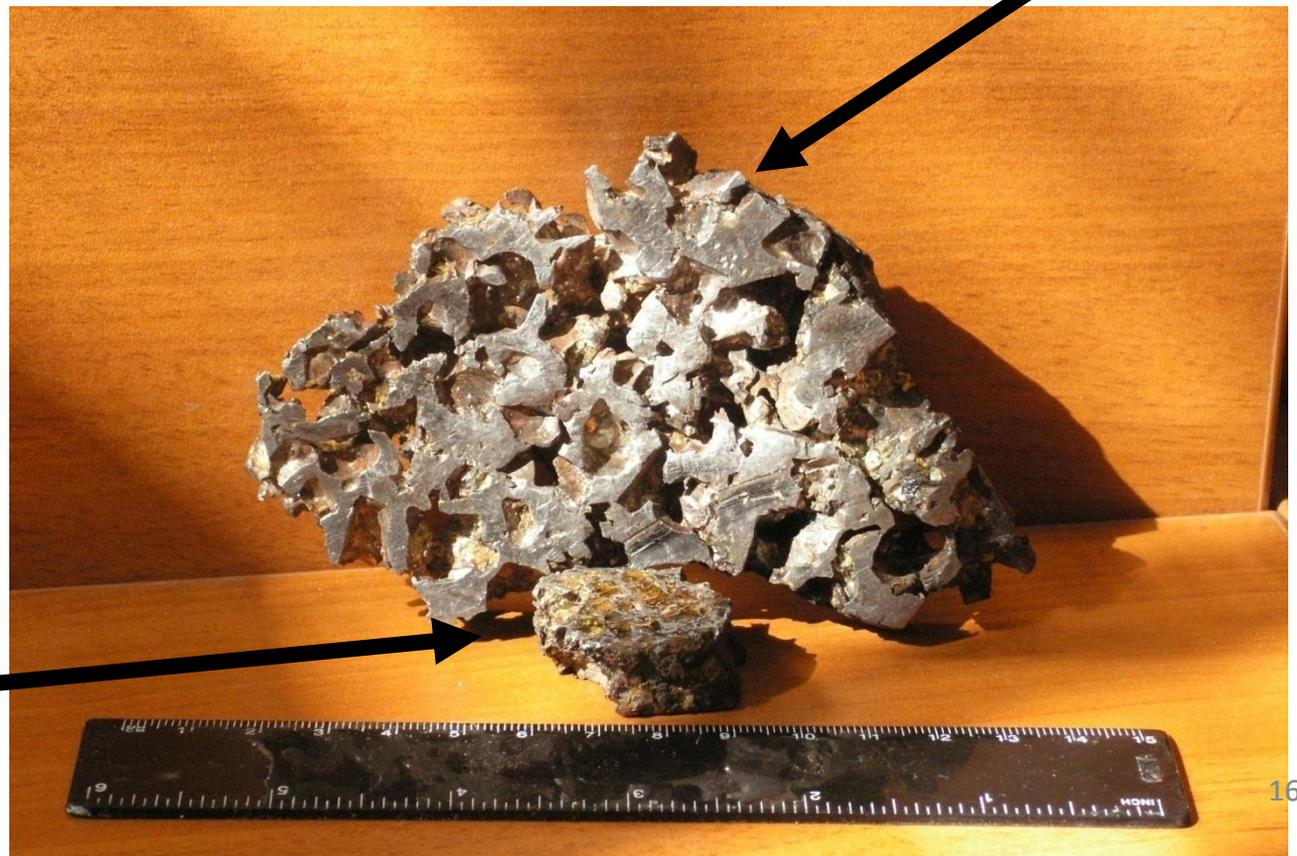
(«ОЛИвины из Метеоритов – Поиск тяжелых и сверхтяжелых Ядер»)

1. Марьялахти (Финляндия, 1902 г.).

Размер ~ 30 см.

Вес ~ 45 кг.

Возраст ~ 185 млн лет



2. Игл Стейшн  
(США 1880 г.).

Размер ~ 25 см.

Вес ~ 38 кг

Возраст ~ 70 млн  
лет

**Проблема** – состав и свойства космических лучей в области тяжёлых и сверхтяжёлых ядер.

**Объект исследования** – метеориты (палласиты), имеющие в своей структуре полупрозрачные минералы (оливины).

**Инструмент** – полностью автоматизированный измерительный комплекс ПАВИКОМ-2.

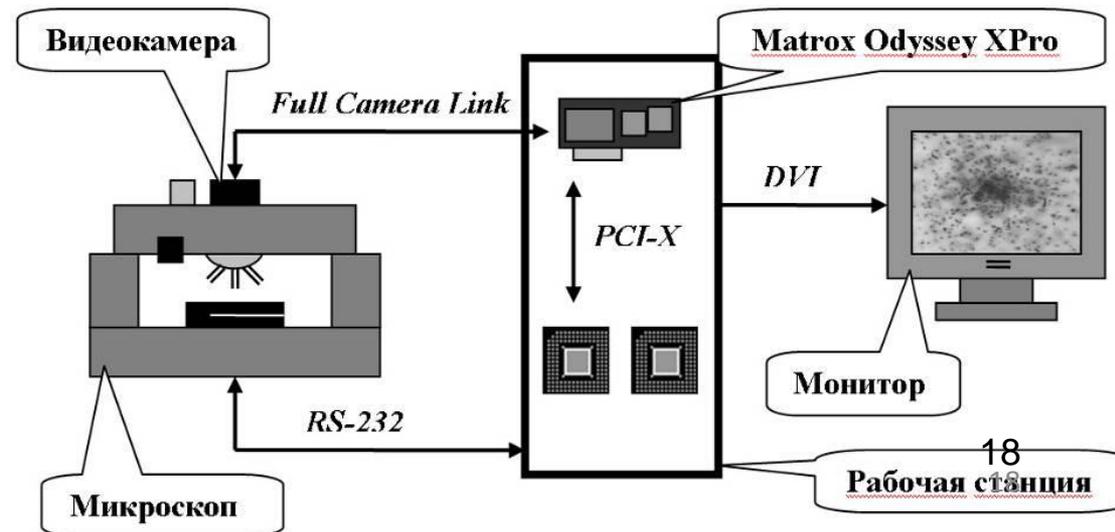
**Метод исследования** – измерение на микроскопе характеристик треков частиц в процессе последовательного цикла травления и среза образцов.



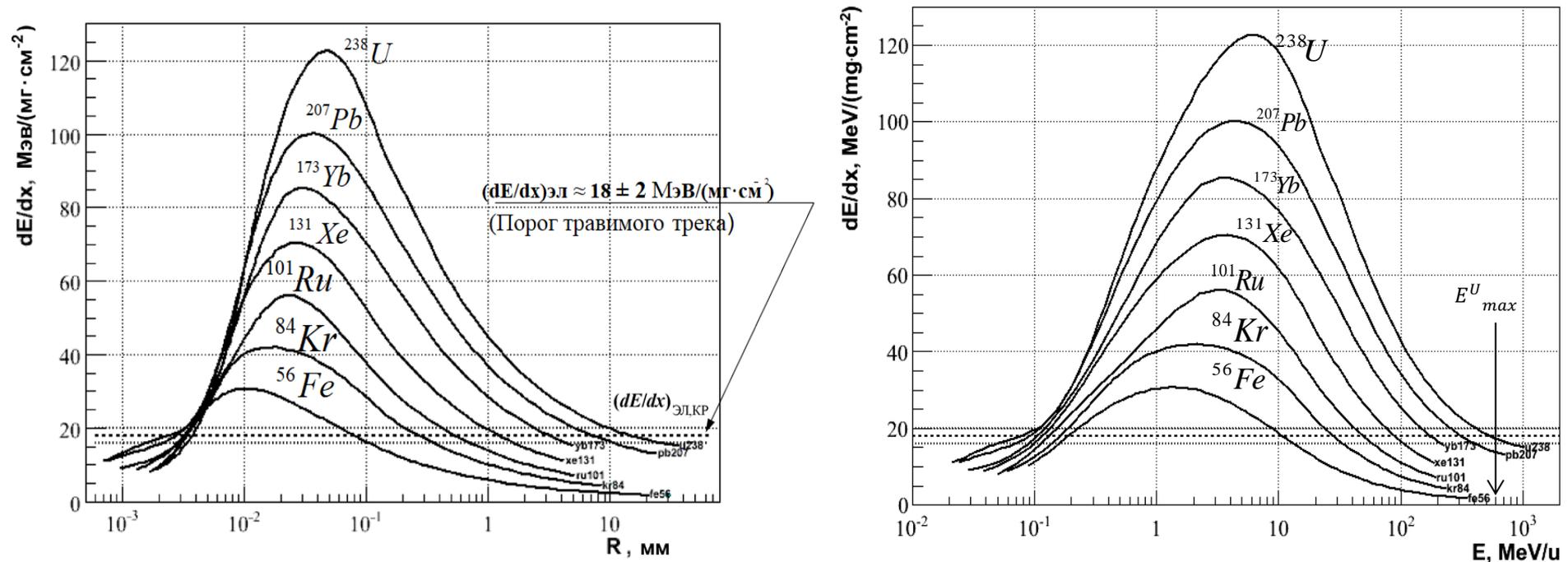
## ПАВИКОМ-2

(Полностью  
Автоматизированный  
Измерительный  
КОМПЛЕКС)

Микроскоп ЛОМО МПЭ-11;  
прецизионный стол фирмы Carl  
Zeiss с блоком управления MCU-  
26; Microtron CMOS-камера с  
размером матрицы 1280× 1024  
пикселей. До 500 кадров в  
секунду , Точность измерения  
координат: 0.5 мкм.



# Ионизационные потери ядер при прохождении через оливин и их связь с возможностью получить протравленные каналы

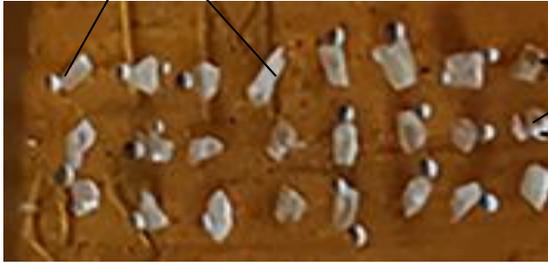


Кривые получены с помощью программного комплекса SRIM-10

Порог регистрации  $18 \pm 2 \text{ МэВ}/(\text{мг} \cdot \text{см}^{-2})$

# Метод послойного травления и среза

кристаллы



эпоксидная таблетка



## Травление кристалла происходит послойно

1. Сотрудниками готовятся эпоксидные таблетки размером  $20 \times 10 \times 5$  мм, в которые внедрены кристаллы оливина.
2. Травление оливина.
3. После травления очередного слоя поверхность полируется.
4. Производится измерение координат концов треков X, Y и Z и их запись.
5. Срезается слой толщиной  $d \sim 50-70$  мкм.
6. Процедура повторяется, с пункта 2. Таким образом, просматривается весь объем кристалла.

# Процедура вычисления длины трека при послойном травлении

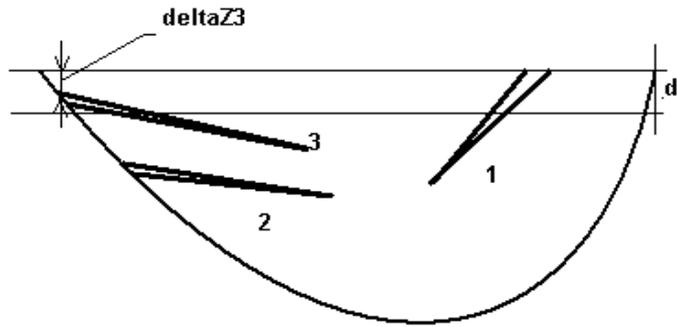
Длина измеренного в одном сеансе трека вычисляется по формуле:

$$R = [X_{\Delta}^2 + Y_{\Delta}^2 + (kZ_{\Delta})^2]^{1/2}$$

где переменные  $X_{\Delta} = X_{\text{кон}} - X_{\text{нач}}$ ,  $Y_{\Delta} = Y_{\text{кон}} - Y_{\text{нач}}$ ,  $Z_{\Delta} = Z_{\text{кон}} - Z_{\text{нач}}$  выражены через координаты начала и конца измеряемого участка трека, а  $k = 1.7$  - коэффициент преломления оливина. Угол падения ядра к поверхности кристалла определяется следующим образом:

$$\cos \theta = \frac{1.7Z_{\Delta}}{[X_{\Delta}^2 + Y_{\Delta}^2 + (1.7Z_{\Delta})^2]^{1/2}} = \frac{1.7Z_{\Delta}}{R}$$





**Тип I** – трек пересекает один или несколько срезанных слоев. В этом случае длина трека складывается из участков  $R_i$ , протравленных в каждом удаленном слое, и участка  $R_{ост}$ , измеренного на последней стадии измерений после всех сошлифовок:

$$L_1 = \sum_{i=1}^N R_i + R_{ост}$$

Типы треков, переходящих из слоя в слой.

где  $R_i = \frac{d_i}{\cos \theta_i}$  – участки трека, сошлифованные на  $N$  стадиях;

$R_{ост} = [X_{\Delta}^2 + Y_{\Delta}^2 + (1.7Z_{\Delta})^2]^{1/2}$  – остаточная длина трека после всех сошлифовок;

$d_i$  – толщина удаленного при сошлифовке  $i$ -го слоя;

$\theta_i$  – угол трека к нормали на  $i$ -й стадии.

$$L_2 = R_i = [X_{\Delta}^2 + Y_{\Delta}^2 + (1.7Z_{\Delta})^2]^{1/2}$$

**Тип 2** – трек находится под срезанным слоем. В этом случае координат на  $i$ -й стадии.

для

**Тип 3** – трек частично пересекает срезанный слой.

$L_3 = (d_i - \text{delta}Z_3)/\cos\theta_i + R_{ост}$ , где  $\text{delta}Z_3 = |Z_{н3} - Z_{п}|$  ( $Z_{п}$  от поверхности на 1-й стадии). Поскольку для треков типа 3 восстановить  $\text{delta}Z_3$  сложно, а попадаются они очень редко, то их решено считать треками типа 1 или типа 2 в зависимости от состояния трека на текущей стадии. Скорость травления трека на  $i$ -й стадии определяется как отношение  $R_{ост}$  к времени травления кристалла на этой стадии.

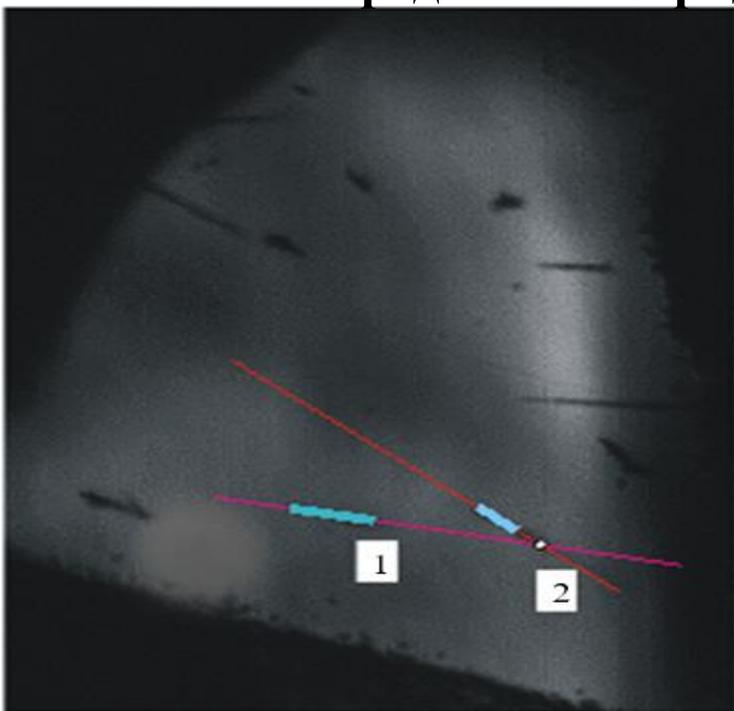
Ошибка определения полной длины трека зависит от ошибок прямых измерений. Ошибка определения длины участка трека на  $i$ -й стадии определяется как ошибка частного:

$$\delta R_i = \frac{(\cos \theta_i) \delta d_i + d_i \delta(\cos \theta_i)}{(\cos \theta_i)^2} \quad \cos \theta_i = \frac{1.7 Z_{\Delta}}{\left[ X_{\Delta}^2 + Y_{\Delta}^2 + (1.7 Z_{\Delta})^2 \right]^{1/2}}$$

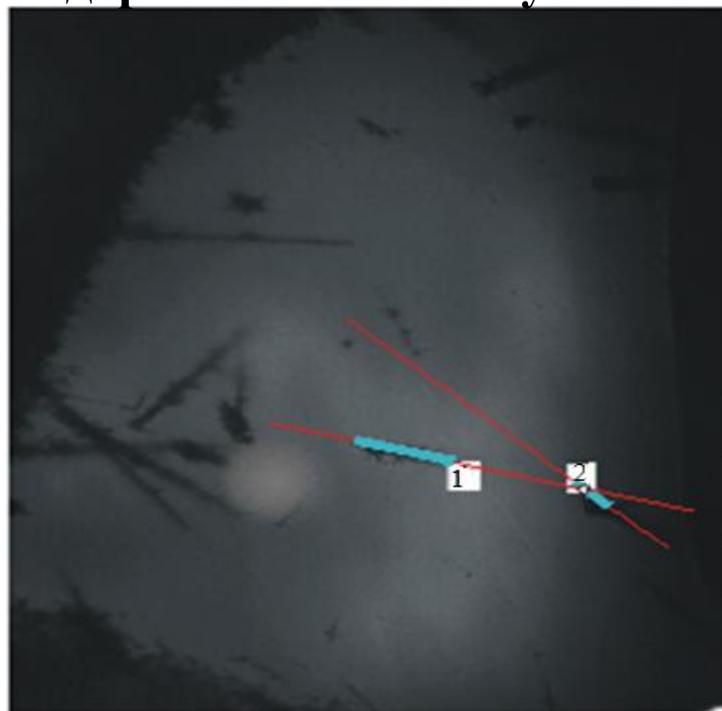
Здесь  $\delta(\cos \theta_i)$  и  $\delta R_{\text{ост}}$  – ошибки косвенных измерений. Прямыми измерениями в данном эксперименте являются только измерения координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  начала и конца трека, а также толщина сошлифованного слоя  $d_i$ , а ошибки косвенных измерений следует выразить через ошибки этих величин.

Ошибка измерений имеет микронную точность. В то же время толщина имеет меньшую точность (более 10 микрон). Необходимо повысить точность.

## Алгоритм определения толщины срезаемого слоя оливина при определении зарядов ядер космических лучей



(a)

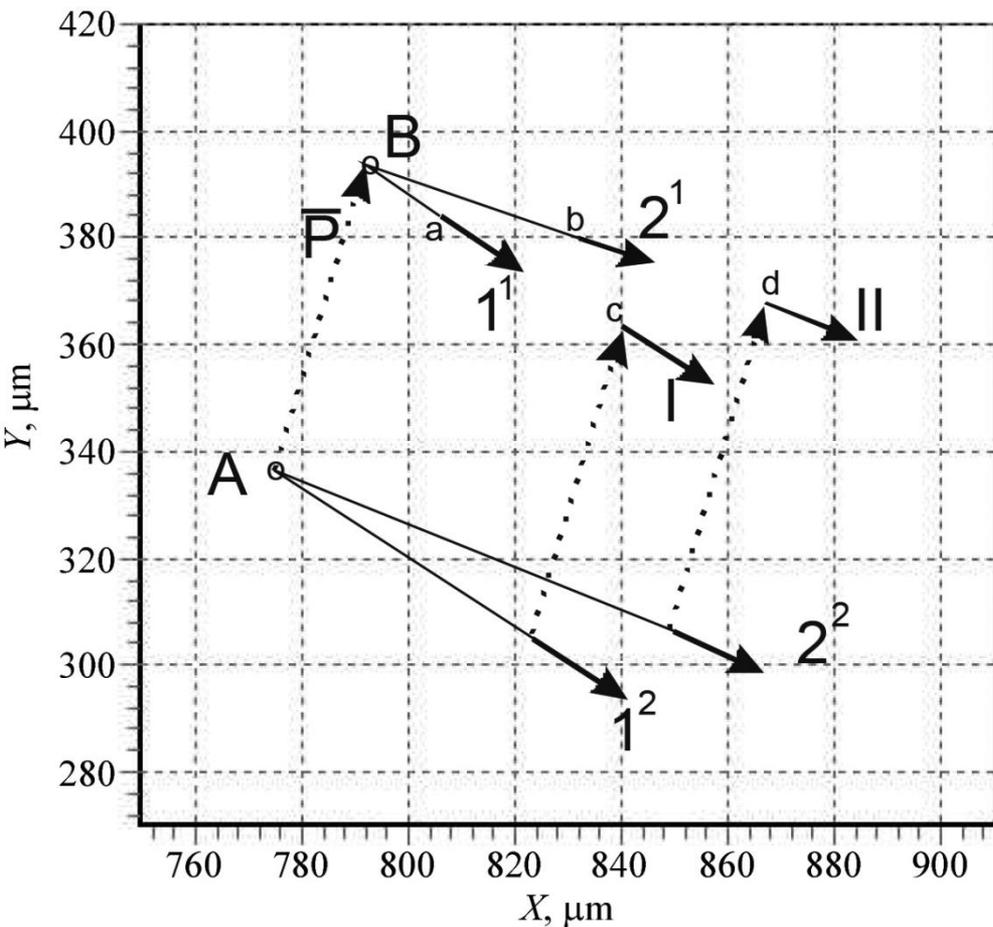


(б)

Схема треков  
ядер с  
протравленными  
участками

В формулу вычисления длины трека входит величина срезаемого слоя, неточность которой может достигать несколько микрон. Для повышения точности этой величины выполняется специальная процедура, которая позволяет повысить точность. Для этого необходимо сравнить два изображения одного и того же трека после последовательных шагов травления. Проблема: измерения производятся в системе координат микроскопа, а относительное расположение треков привязано к системе кристалла, которая случайным образом располагается на столике микроскопа. Необходимо найти на изображении “неподвижную точку”, которая свяжет две системы координат.

# Схематичное изображение положения треков 1 и 2 в координатных системах микроскопа и кристалла.



По координатам концов треков 1 и 2 на двух стадиях травления положение прямых, связанных с треками, определяется с большой точностью. Затем определяются их точки пересечения. По положению этих точек можно определить вектор смещения координатных систем кристалла на двух стадиях по отношению к системе микроскопа и затем перевести все протравленные треки к одной системе координат. Точки a, b c и d точки входа, т.е. лежат на поверхностях кристалла на разных стадиях. По смещению треков в плоскости XY, то есть по величине отрезков ab и cd, можно найти расстояния между поверхностями кристалла на разных стадиях, то есть толщину среза, т.к. угол трека к поверхности кристалла известен из измерений.

# Результат

- Расчёты, проведённые для треков 1 и 2, дают для величины  $Z$  значения  $Z_{ac} = 48,6$  мкм  $Z_{bd} = 47,3$  мкм при номинальном значении толщины 50 мкм.
- Если учесть третий трек на этом кристалле, а также треки, имеющие продолжение, на других кристаллах этой таблетки, получим статистическую оценку толщины среза  $Z=49,6\pm 0,5$  мкм.

## Калибровочные эксперименты

Для определения зарядов ядер нужна связь между зарядом и характеристиками трека.

С этой целью нами были проведены облучения земных и космических оливинов.

1. Ланьчжоу (Китай).

Ядра  $^{56}\text{Fe}$ .

Энергии 2,5 МэВ/нуклон, 4,3 МэВ/нуклон и 9,1 МэВ/нуклон

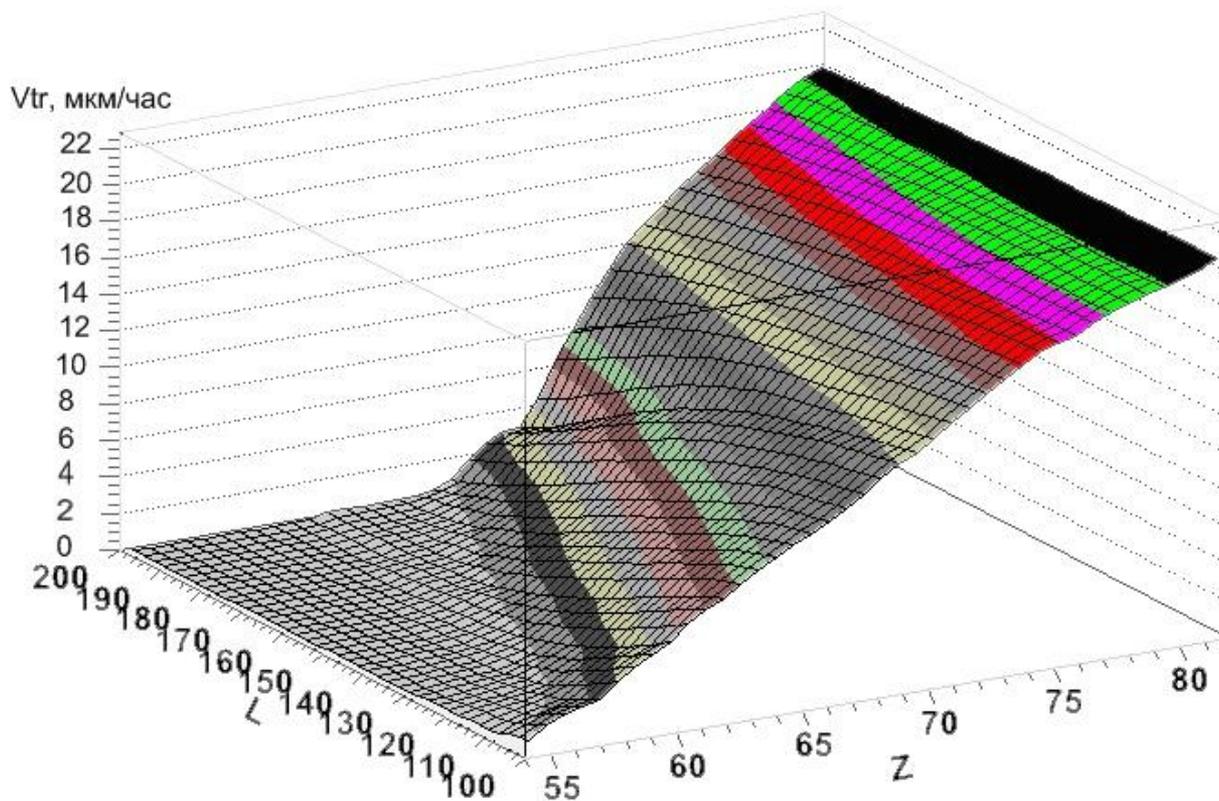
2. Дармштадт (Германия).

Ядра  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{238}\text{U}$  и  $^{197}\text{Au}$ .

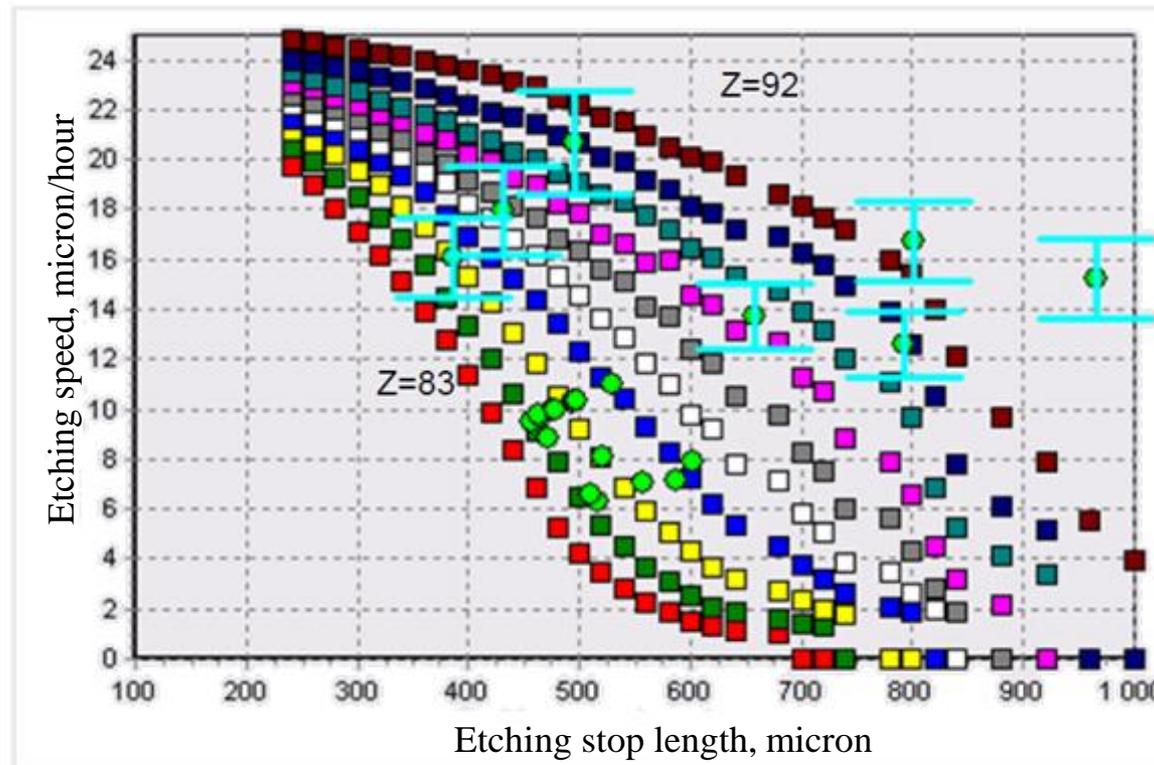
Энергия 11,4 МэВ/нуклон

# Связь между зарядом, травимой длиной и скоростью травления (УФН, том 180, № 8, стр.839-842, 2010).

The surface Z-L-V

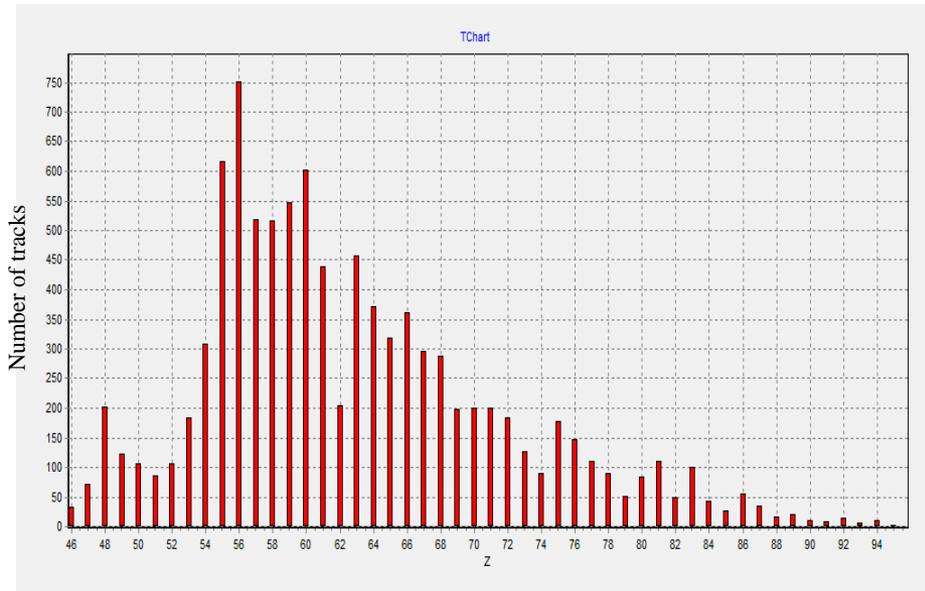


# Методика определения заряда ядра

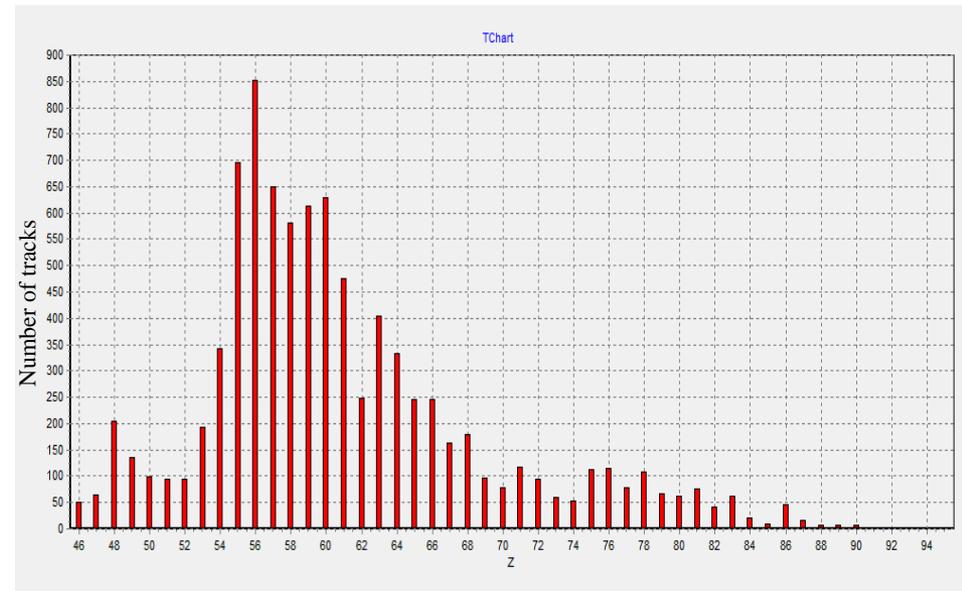


Сопоставление величин  $L$  и  $V$  заряду с использованием калибровочных кривых.

# Зарядовые распределения метеоритов Марьялахти и Eagle Station

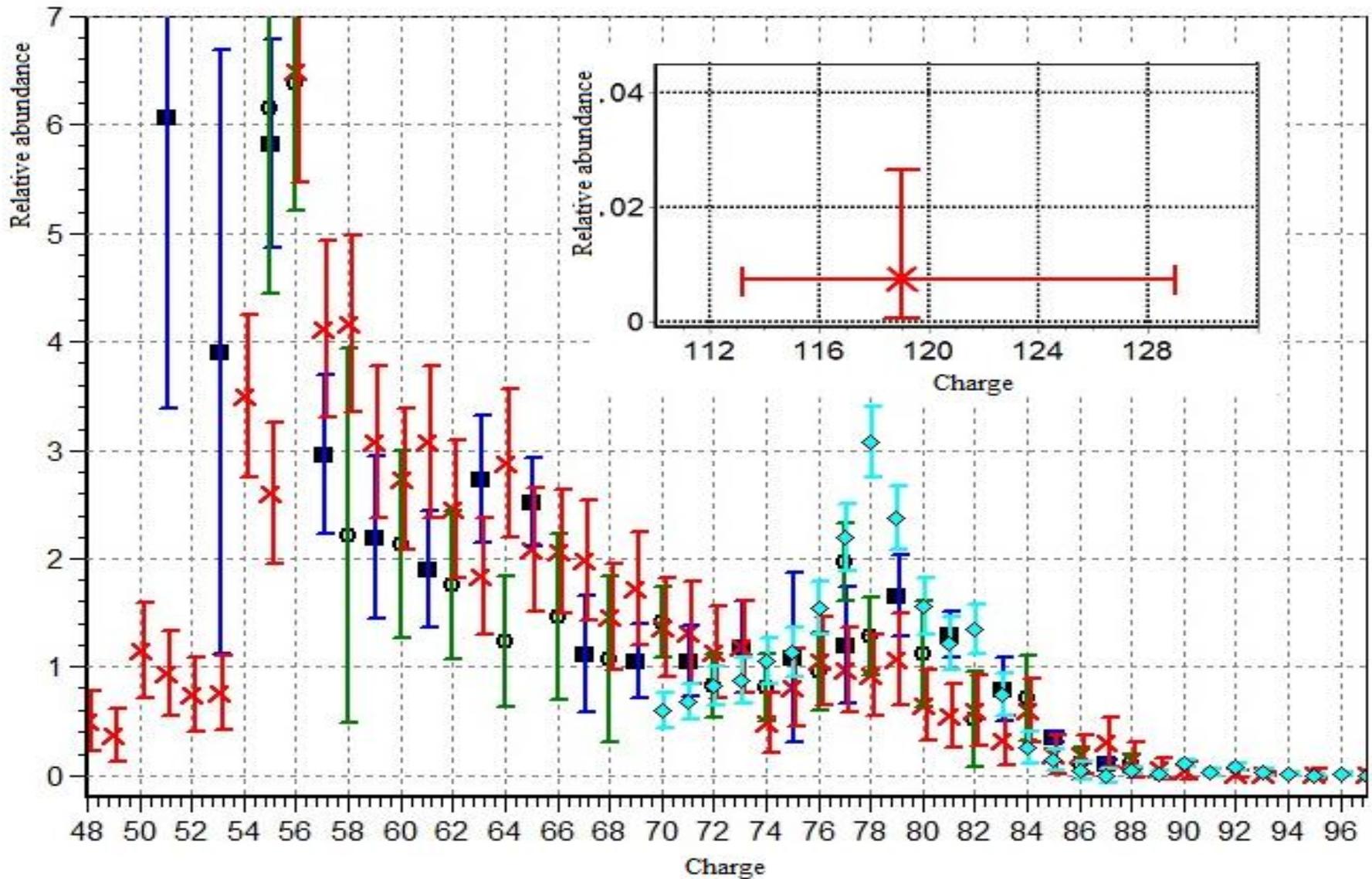


Марьялахти



Eagle Station

В метеорите Марьялахти найдено **16892** треков, а в Eagle Station **8994** треков.  
Всего найдено **25886** треков.



Распространённость сверхтяжёлых элементов  $A_Z$  ( $A_{Fe}=10^6$ ). Кружки – Ariel-6, квадраты – HEAO-3, ромб – UHCRE, кресты - наши измерения.

Общий объем полученных треков, найденных в 853 кристаллах составил около 26000 треков ядер с  $Z > 40$ . Полученный спектр хорошо согласуется с результатами других экспериментов - HEAO, ARIEL и UHCRE.

В числе обработанных ядер идентифицировано: в диапазоне  $40 < Z < 50$  - 2771 ядер; в диапазоне  $50 < Z < 80$  - 22617 ядер; в диапазоне  $80 < Z < 92$  - 457 ядра; в диапазоне  $92 < Z < 100$  - 6 ядер.

Найдено 3 ядра с зарядом  $\sim 119_{-6}^{+10}$

**Нас цитируют многие, в частности,**

S.A. Giuliani et al., Colloquium: Superheavy elements: Oganesson and beyond, Rev. Mod. Phys. 91 (2019) 011001 **имп-фак журнала 36,917**

B.F. Thornton and S.C. Burdette, Neutron stardust and the elements of Earth, Nat. Chem. 11 (2019) 4. **имп-фак журнала 28,79**

Y. Komiya and T. Shigeyama, R-process element cosmic rays from neutron star mergers, Astrophys. J. 846 (2017) 143 [arXiv:1708.05638]. **имп-фак журнала 6**

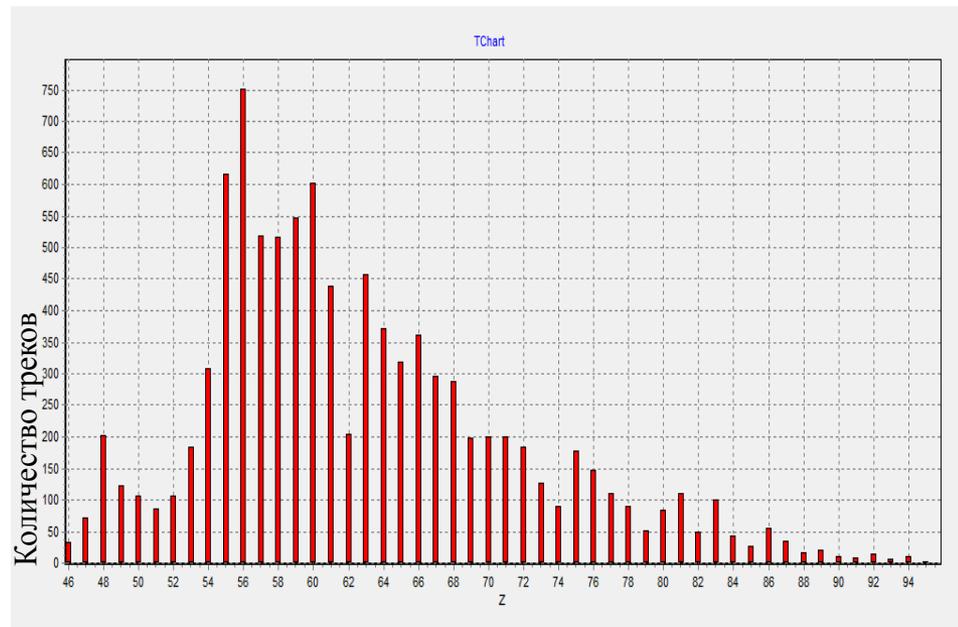
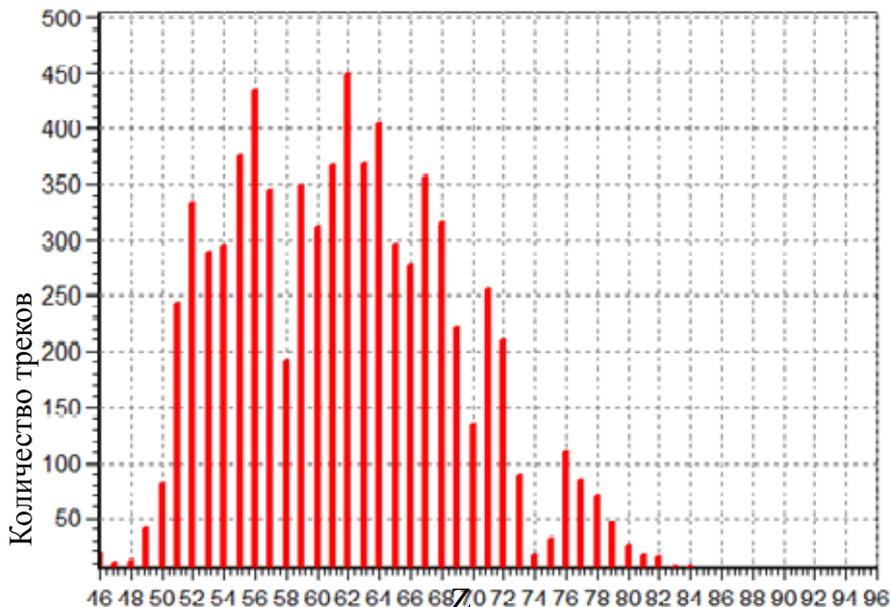
## IV. Особые случаи в эксперименте ОЛИМПИА при анализе треков из метеоритов

- Особенности зарядовых спектров ядер из кристаллов в некоторых таблетках.
- Анализ особенностей треков необычной формы.
- Особенности метеорита Сеймчан.

# Особенности зарядовых спектров ядер из кристаллов в некоторых таблетках

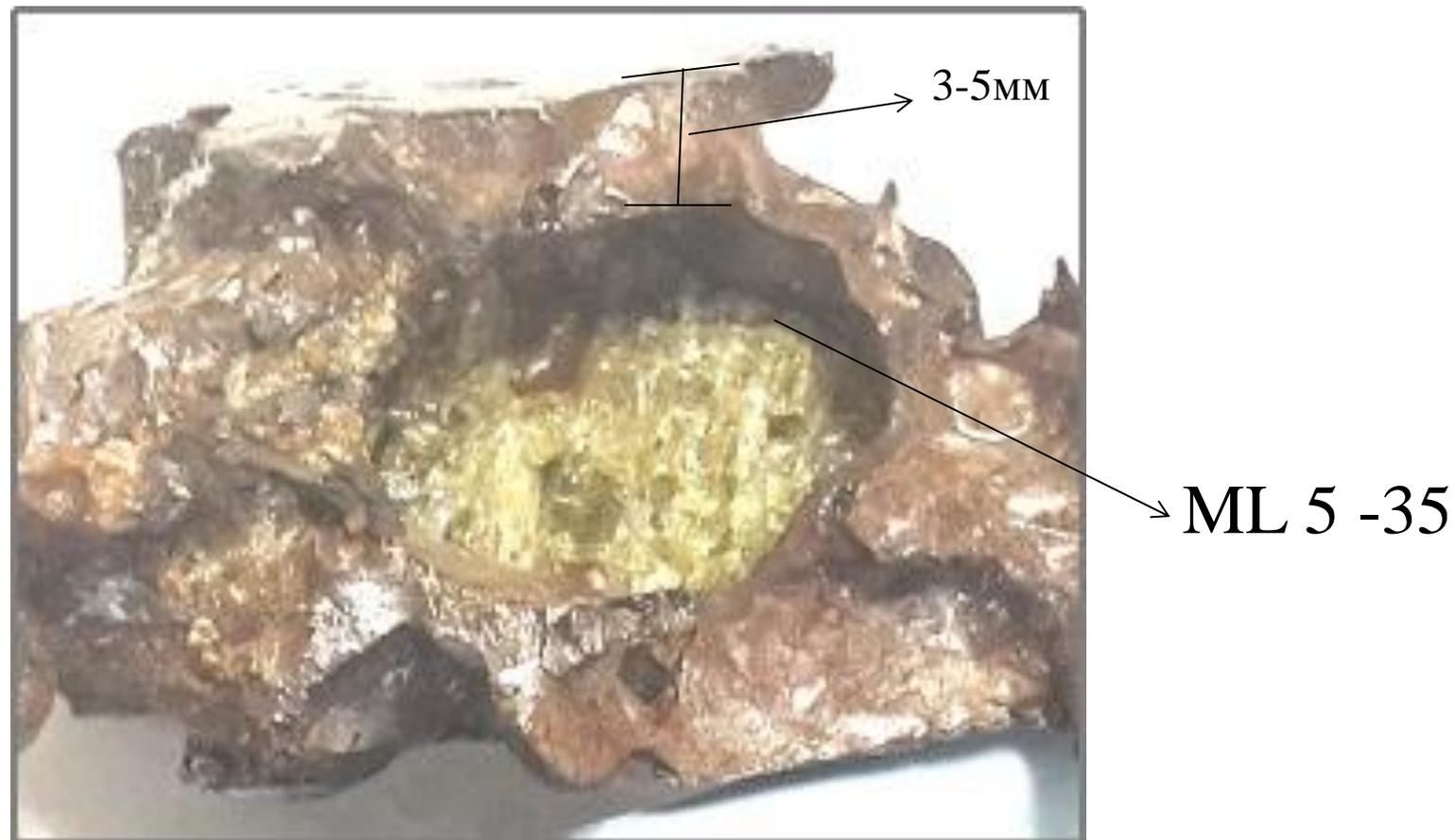
Спектры кристаллов оливинов в таблетках ML- 5,6,7,8,9,10,11,12,13,15,16,17,18,21, 22,24,25,26,27,30,33,35

Зарядовый спектр метеорита Марьялахти.



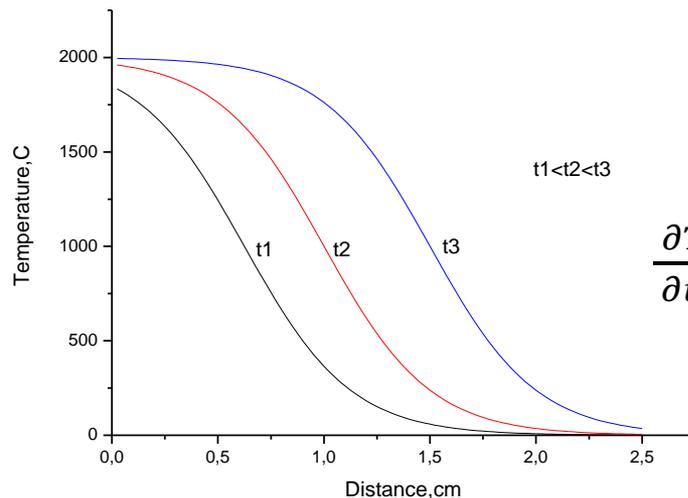
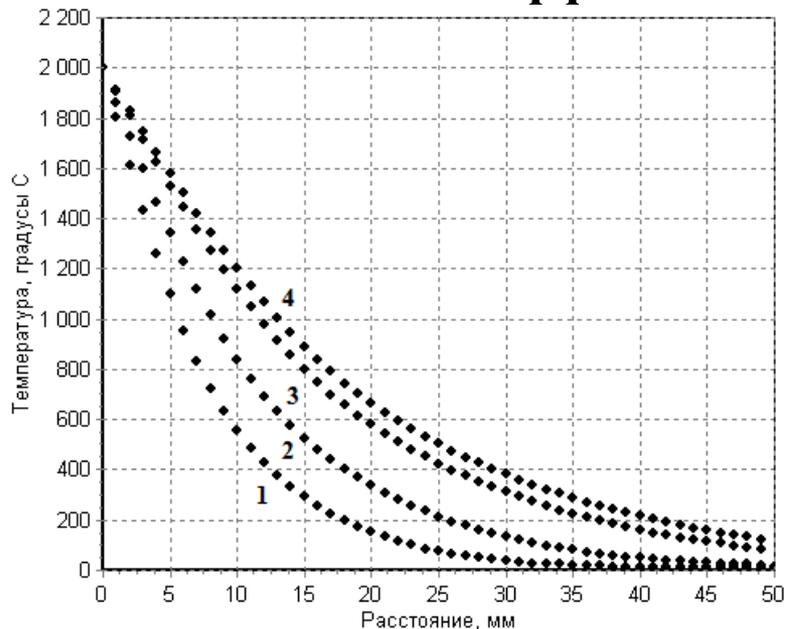
Сравнение спектров ядер двух наборов кристаллов

В процессе работы нами были обнаружены спектры ядер необычной формы. При обработке образцов из метеорита Марьялахти после 24 часов травления в некоторых таблетках ML мы нашли 7126 треков, у которых зарядовое распределение имеет необычный вид.



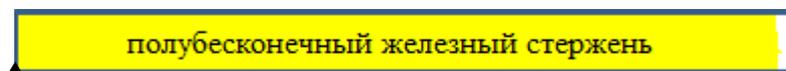
Кристаллы для таблеток ML-5-35 были взяты из крупной лунки, расположенной на расстоянии 3-5 мм от поверхности метеорита.

# Результаты расчёта для полубесконечного стержня с учётом температурной зависимости коэффициента температуропроводности

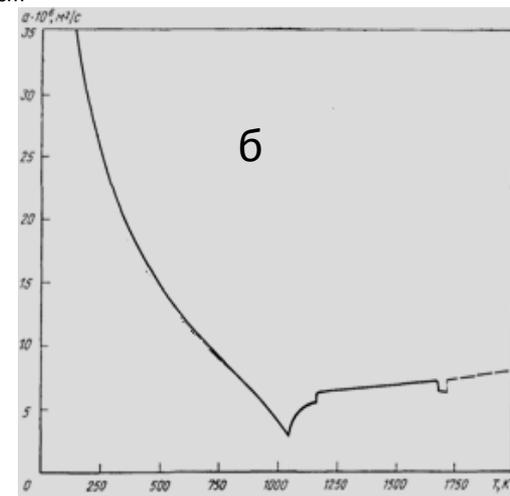
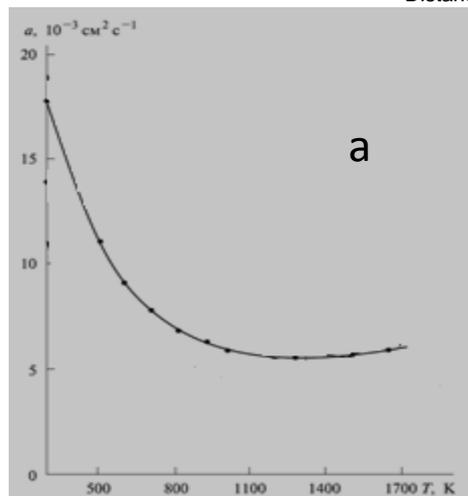


$$\frac{\partial T}{\partial t} = a(T) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

Зависимость температуры от расстояния до начала стержня и времени. Время прогрева 5 (1), 10 (2), 20 (3) и 25 (4) с.



$t = 2000^{\circ}C$



Зависимость коэффициента температуропроводности  $a(T)$  для оливина (а) и железа (б).

## Расчет для модели в виде железной решетки

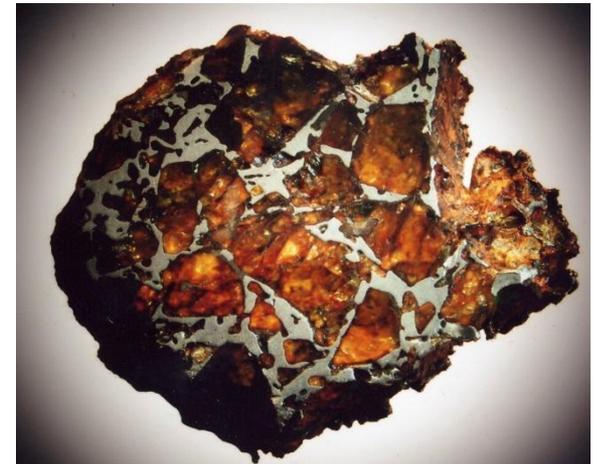
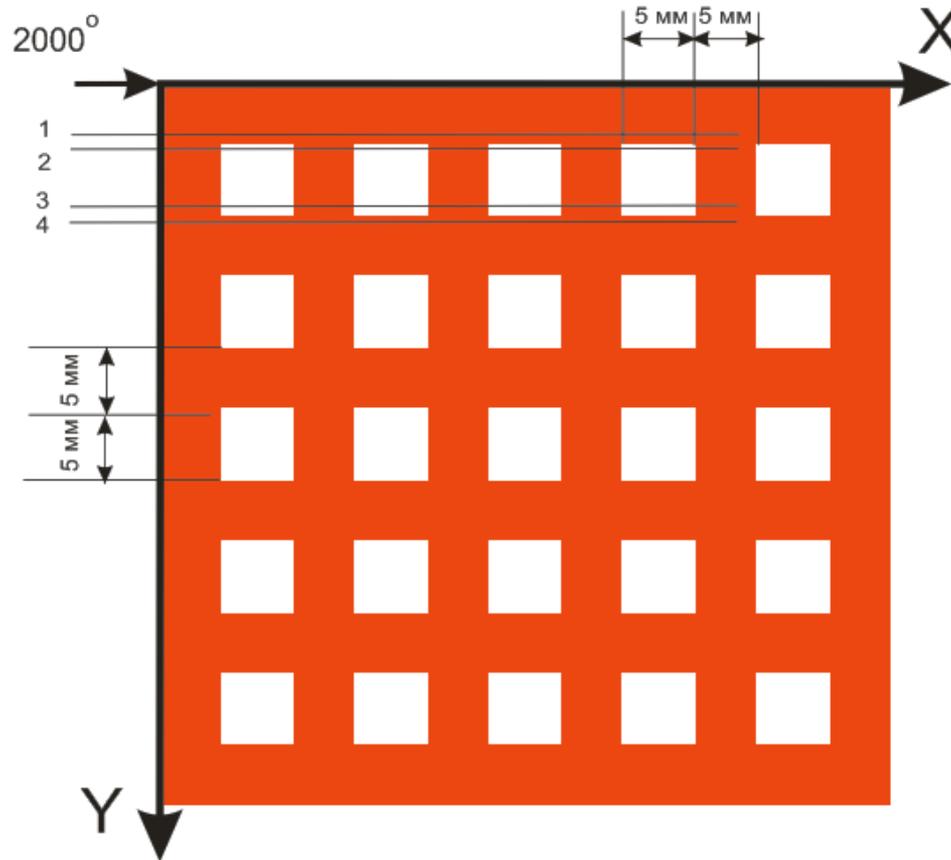
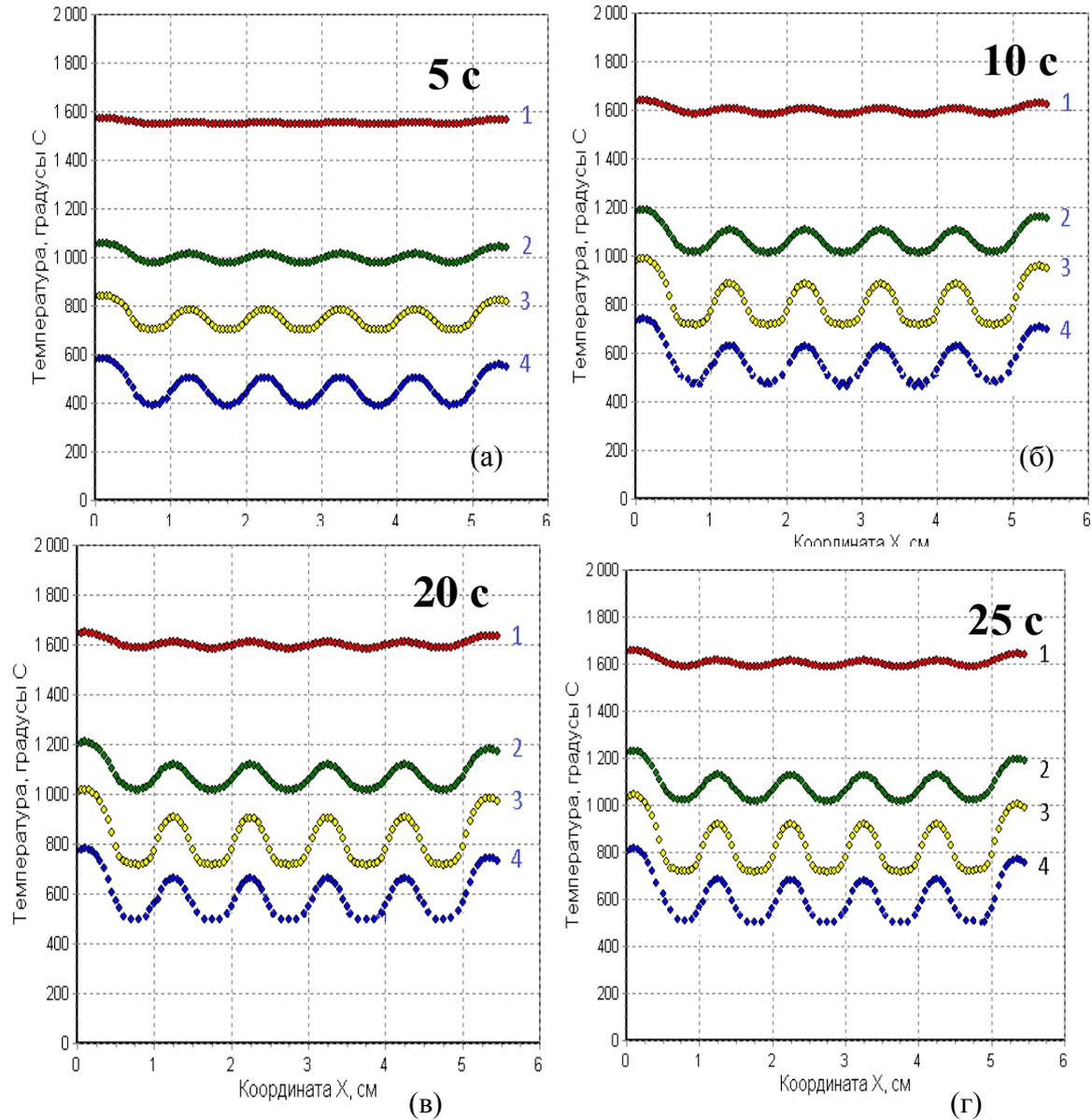


Схема железной решётки с ячейками оливина.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a(T) \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$

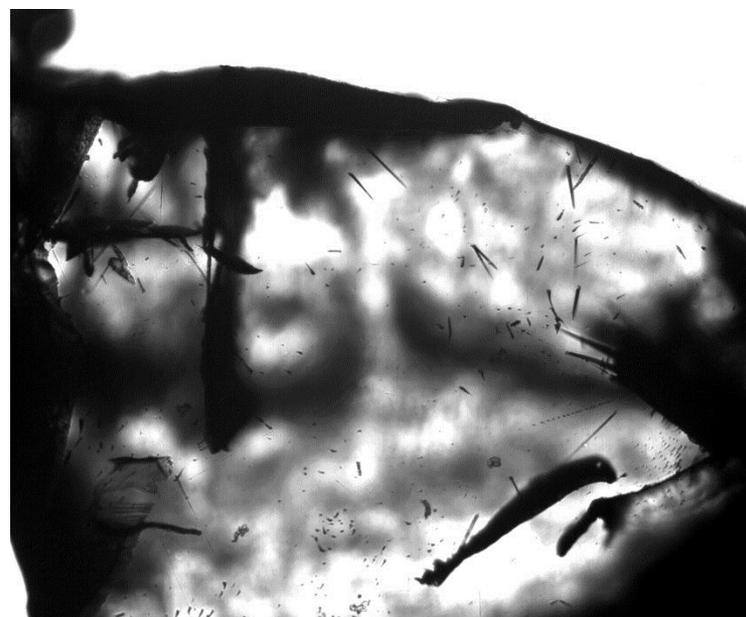


Распределение температуры вдоль координаты X при фиксированных расстояниях до нагретого края при разных значениях времени. Номера рядом с кривыми соответствуют расстояниям по оси Y: 1 – 3мм, 2 – 7мм, 3 – 9мм, 4 – 12 мм.

## Результаты травления двух типов кристалла оливина



Кристалл, взятый из  
глубины метеорита



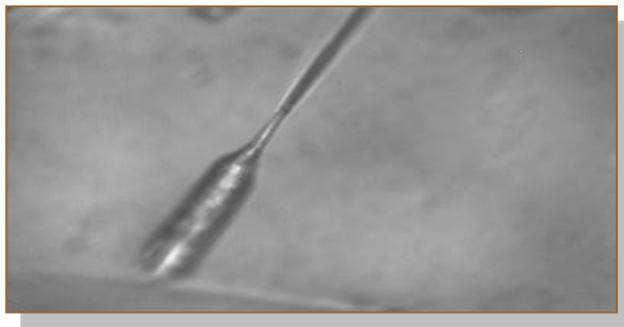
Кристалл, взятый вблизи  
края метеорита

У края метеорита треки железа отсутствуют.

# ВЫВОД

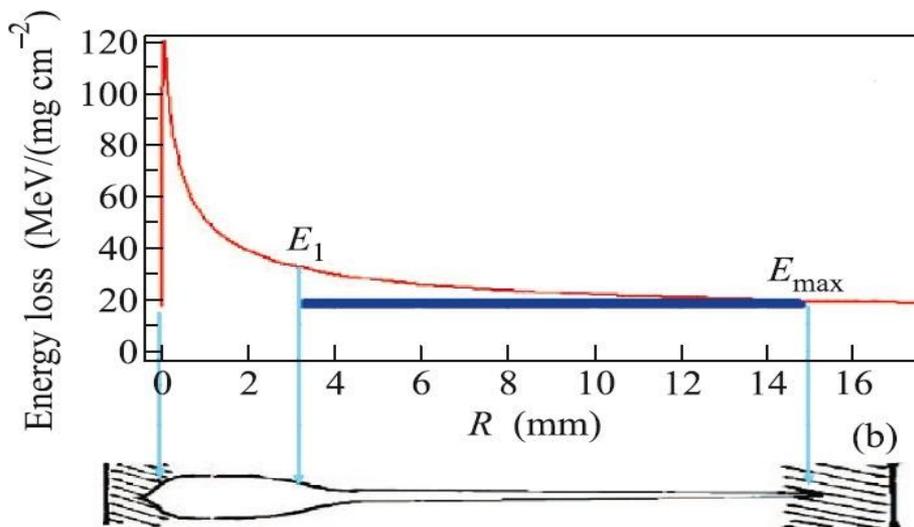
- Появление распределения зарядов ядер необычной формы в кристаллах оливина из метеоритов происходит из-за близости отдельных кристаллов оливина к сильно нагретому краю метеорита, в результате чего происходит отжиг треков.
- Это приводит к существенному изменению геометрических особенностей треков и искажению их зарядового распределения.

# Анализ особенностей треков необычной формы



В процессе работы примерно в 2% случаев наблюдались треки необычной формы в виде шприца.

Очевидное предположение: причина - пик Брэгга: -



# Проверка роли пика Брэгга в формировании треков в виде шприца

Чтобы проверить эту гипотезу, были проведены расчёты в программном пакете GEANT4.

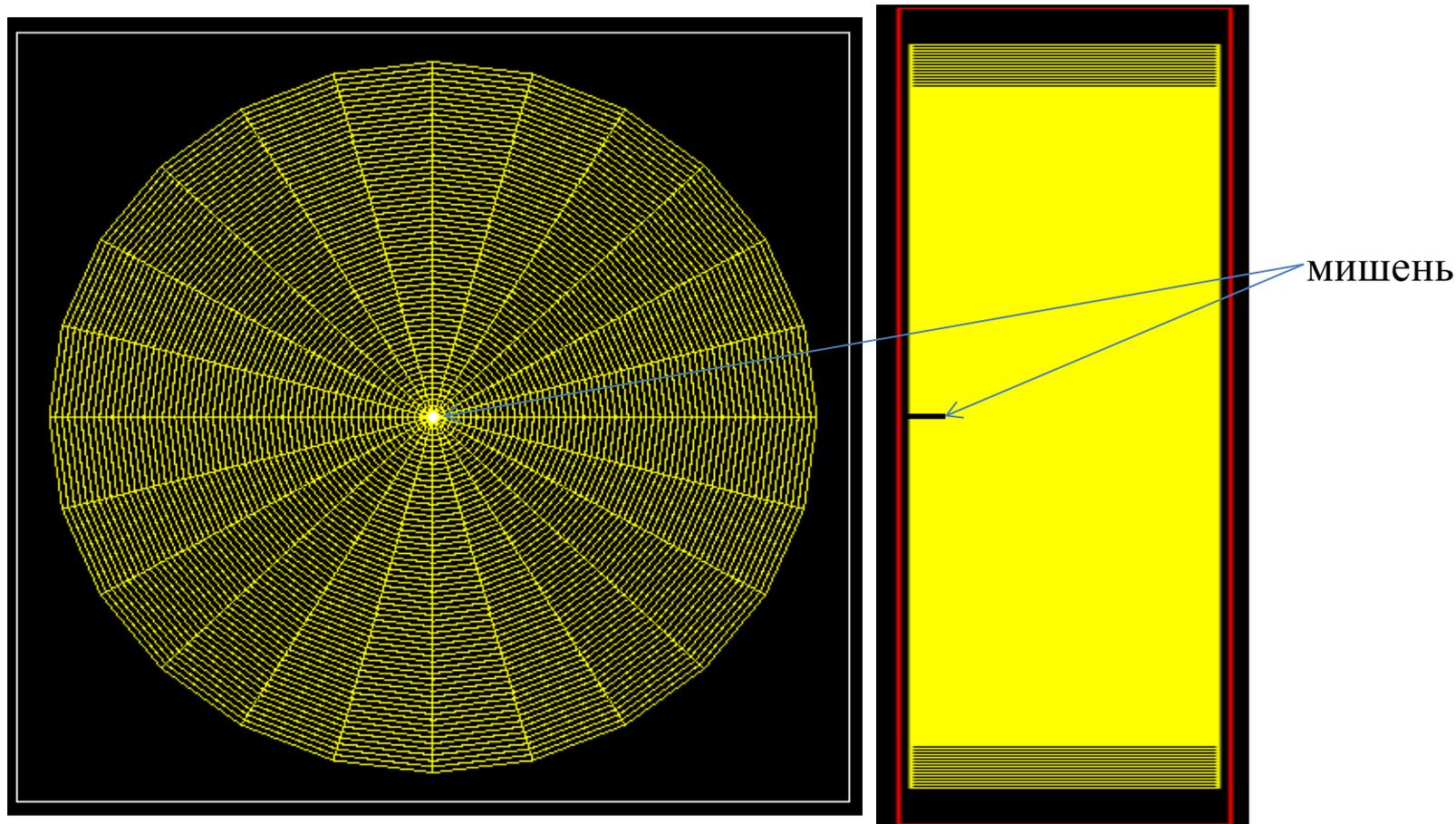
Эта программа позволяет проследить все возникающие частицы от момента рождения до их точки останова и получить информацию о положении в пространстве и энергии частицы на всех шагах движения.

Для проведения расчётов на языке C++ был разработан проект, включающий детектор, с целью получить распределения электронов по разным характеристикам при прохождении тяжелых ионов с разными энергиями.

Основной целью было выяснить как далеко от трека иона создаются условия для повышенной способности к растворению (травлению).

Показатель этих условий – плотность выделенной электронами энергии (доза)  $D \sim 10^{12} \text{ рад} \sim 10^8 \text{ МэВ/мкм}^3$

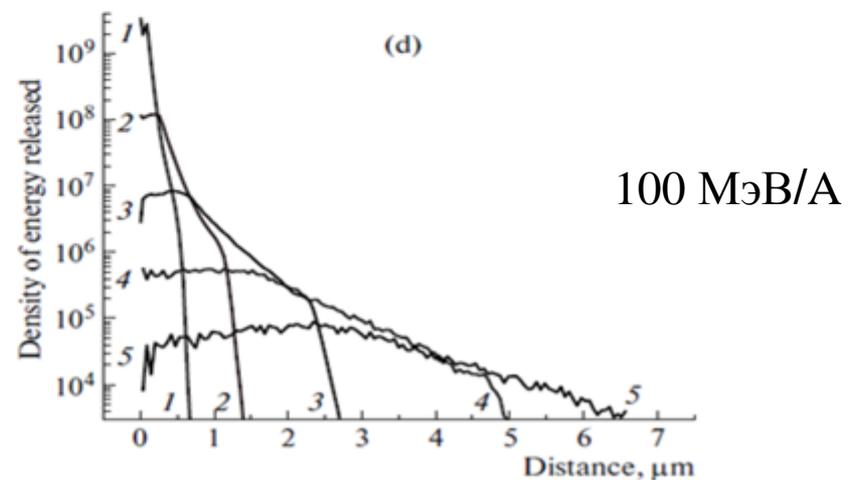
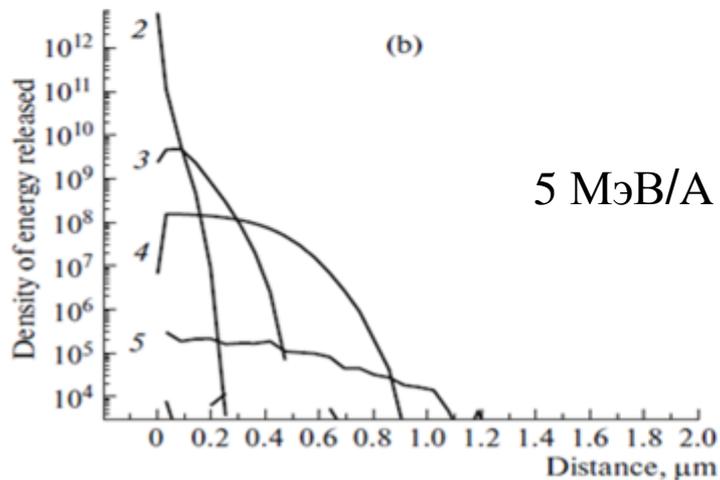
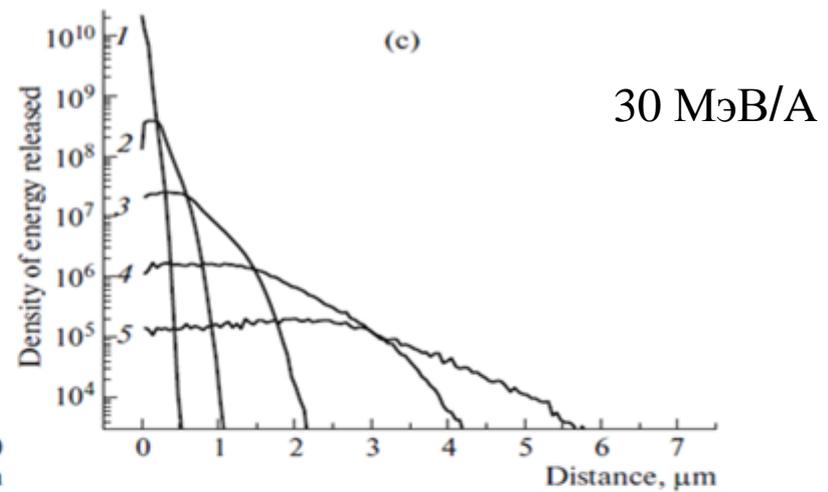
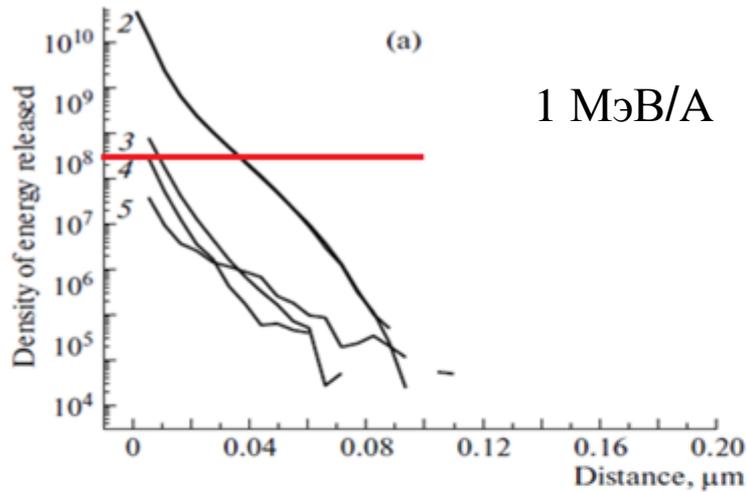
## Конструкция модели детектора (цилиндрические слои)



Конструкция детектора включает центральную часть (мишень) в виде цилиндра диаметром  $R_0=2,5\text{нм}$  и длиной  $L_0=200\text{нм}$ . Он окружён серией коаксиальных цилиндрических слоёв толщиной  $T_h=50\text{нм}$  с зазорами  $D=0,1T_h$  между ними, и длиной  $L=2\mu\text{м}$ . Число цилиндрических слоёв  $N=120$ . Внешний диаметр  $6\mu\text{м}$ .

Количество первичных электронов с энергией  $E > E_{cut} = 500$  эВ, возникающих при столкновениях иона с атомами и вторичными электронами для разных ядер и энергий

Energy of nucleus, MeV/nucleon	1	5	10	30	50	100
Primary electrons						
Ba	1224	728	502	241	163	96
Au	1558	1275	973	549	395	242
U	1591	1572	1267	773	574	364
Secondary electrons						
Ba	99	209	164	77	52	30
Au	84	307	309	177	126	77
U	59	340	382	250	184	116



Плотность энергии [МэВ/мкм<sup>3</sup>], выделяемая электронами в детекторе, в зависимости от расстояния до трека и времени для ядра урана с энергиями 1 (а), 5 (b), 30, (c) и 100 (d) МэВ /нуклон.

Время: 1—5, 2—10, 3—20, 4—40, 5—60 фс.

$$D = \sim 10^{12} \text{ рад} \sim 10^8 \text{ МэВ/мкм}^3$$

# ВЫВОД

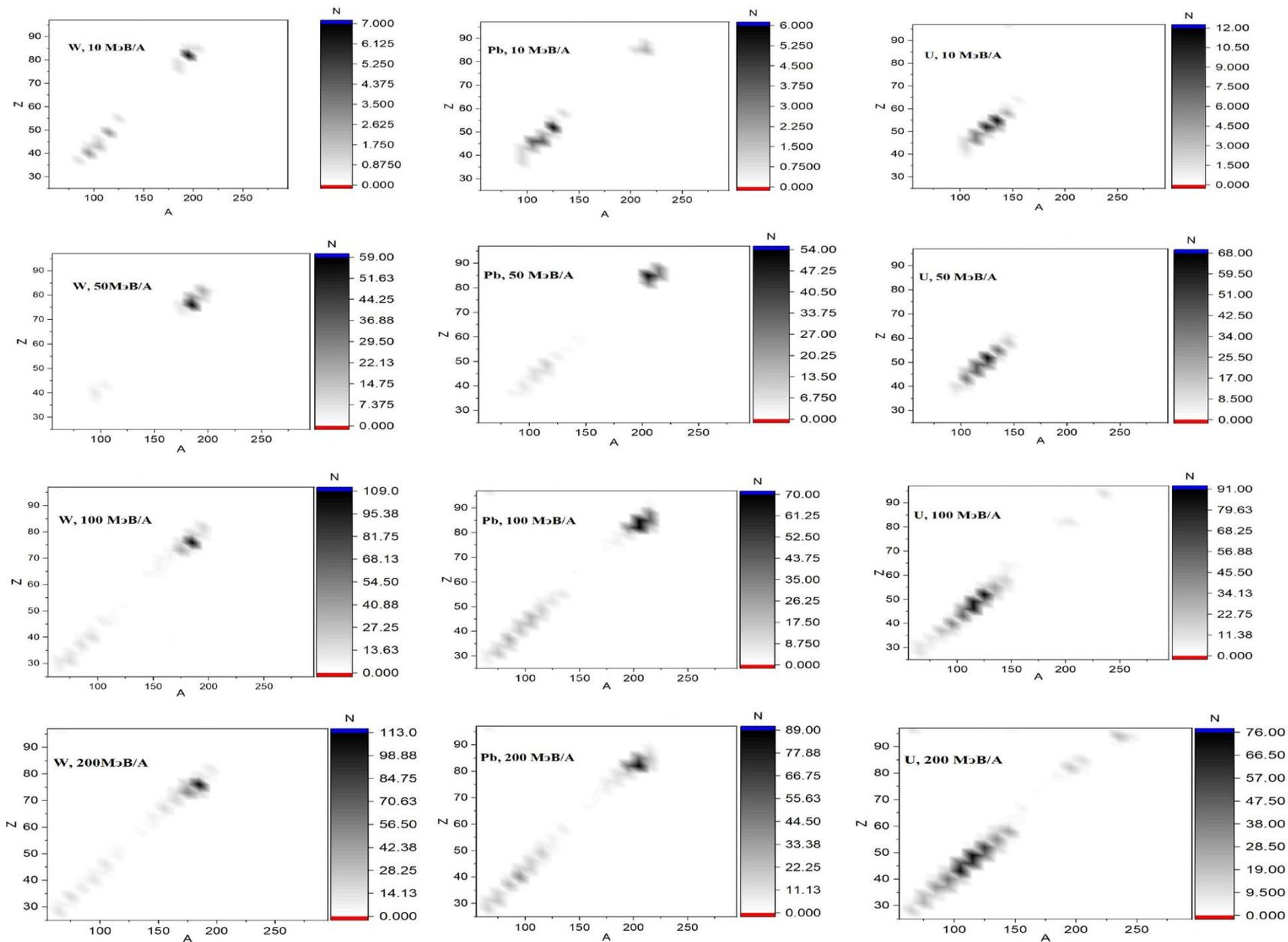
- Полученные результаты для урана и других ядер показывают, что выделенной энергии и числа дельта электронов не достаточно для создания резкого изменения условий травления и образования “шприцов” диаметром в несколько микрометров.
- Необходимо было исследовать роль неупругих ядерных взаимодействий и их способность создать условия для возникновения “шприцов”.

## Роль ядерного канала взаимодействий при прохождении тяжелых ионов через оливин

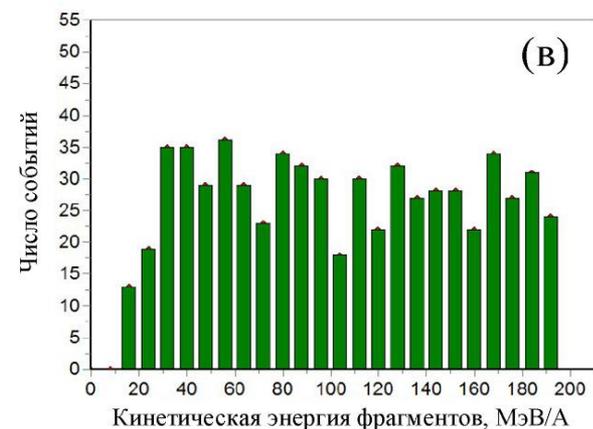
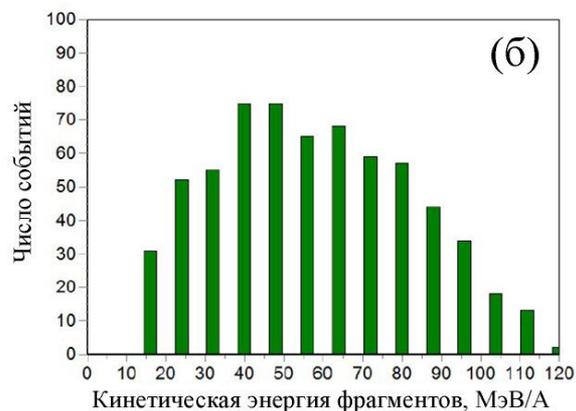
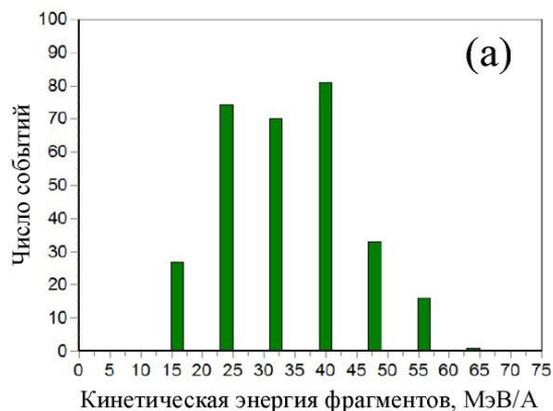
- При взаимодействии тяжелые ионы в оливине могут значительно трансформироваться (*распасться на фрагменты, развалиться, подхватить кластеры и т.д.*).
- Фрагменты налетающего ядра имеют большую скорость и будут разлетаться под малым углом друг к другу. При этом травящий раствор может захватить область между фрагментами, имитируется один широкий трек.
- Для проверки этой возможности были проведены расчёты прохождения тяжелых ионов через оливин для нескольких ядер при нескольких энергиях с помощью программного пакета Geant4 .
  - Были разыграны события взаимодействия ядер W, Рь и U при четырёх значениях энергии: 10, 50, 100 и 200 МэВ/А.

Число событий фрагментации для ядер W, Рь и U при разных энергиях и количество разыгранных событий

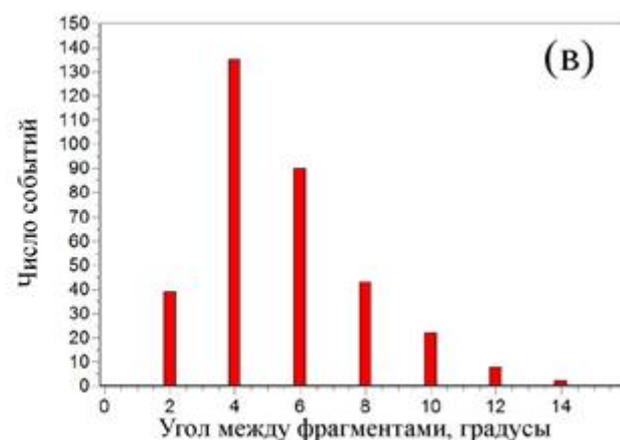
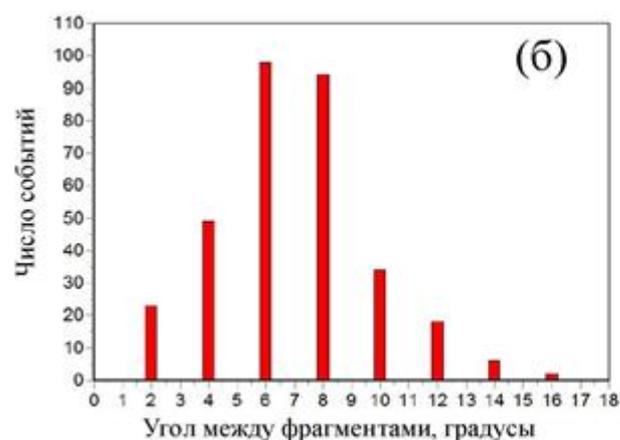
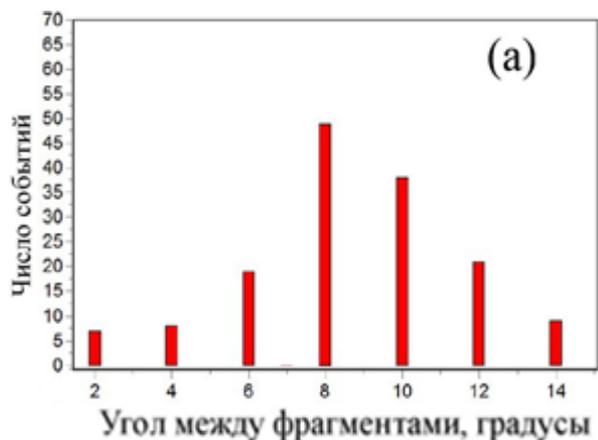
Ядро	Энергия (МэВ/А), число разыгранных событий			
	10, 50000	50, 10000	100, 10000	200, 5000
W	17	172	374	502
Рь	16	169	430	535
U	29	179	416	532



**Распределения числа  $N$  событий фрагментации налетающего ядра по массе  $A$  и заряду  $Z$  при всех значениях заряда и энергии**



Распределение фрагментов урана по кинетической энергии  $U$ .  
 а – 50 МэВ/А; б – 100 МэВ/А; в – 200 МэВ/А.

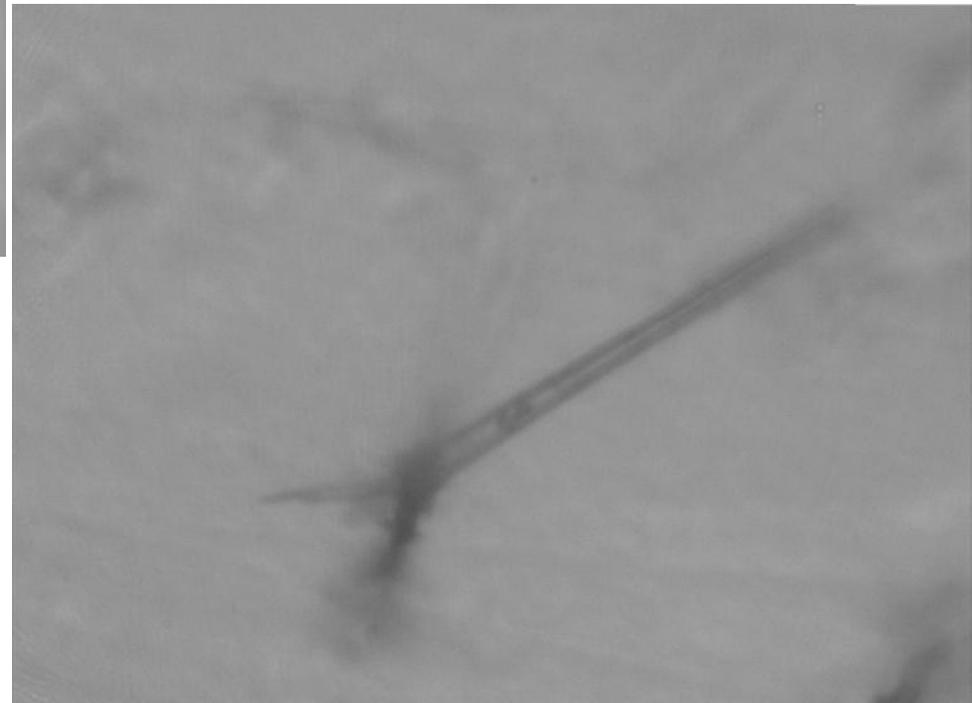
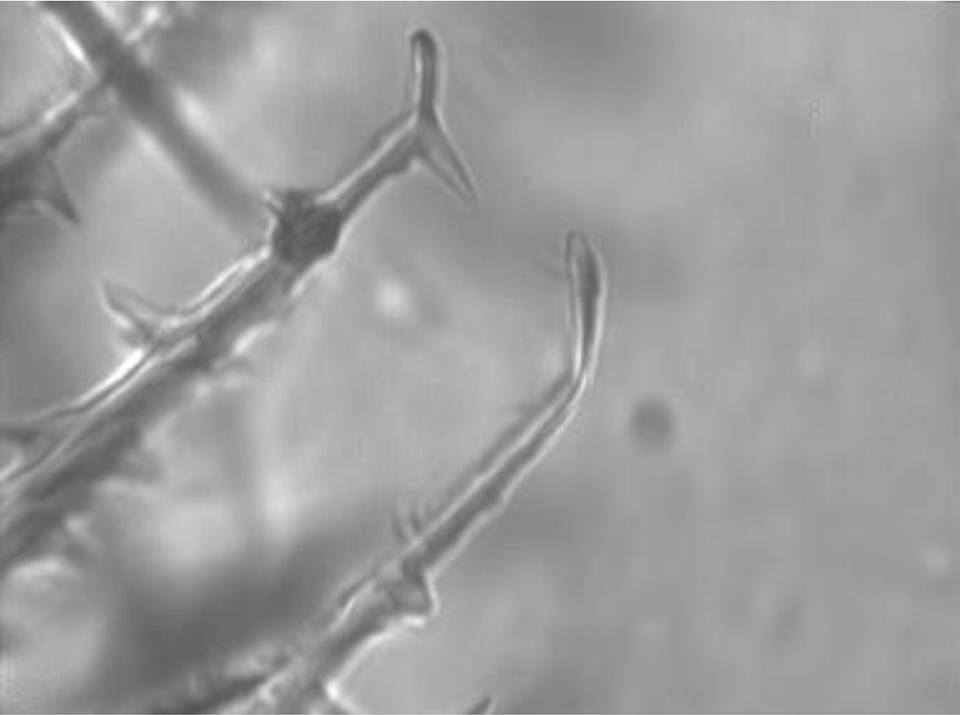


Распределение по углам разлёта фрагментов  $U$  в зависимости от энергии.  
 а – 50 МэВ/А; б – 100 МэВ/А; в – 200 МэВ/А.

# ВЫВОД

- Проведённые исследования показали, что существует возможность образования треков-шприцов за счёт фрагментации при определённых условиях. В частности, наибольший вклад здесь дадут тяжелые ядра с  $Z \geq 82$ .
- В то же время должны существовать неупругие события, в которых фрагменты разлетаются слишком далеко друг от друга и травятся по отдельности.

# Пример событий фрагментации



## Метеорит из Мьянмы



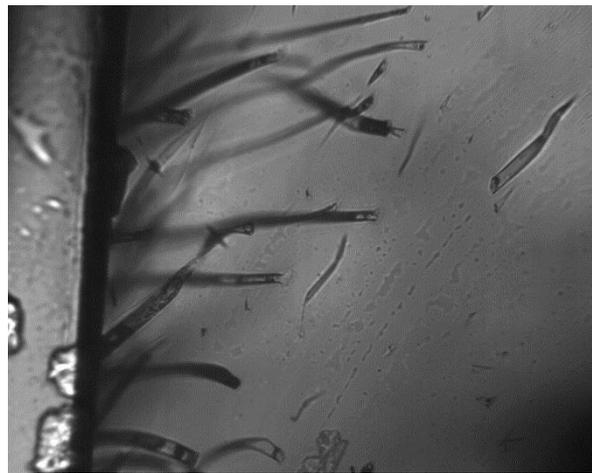
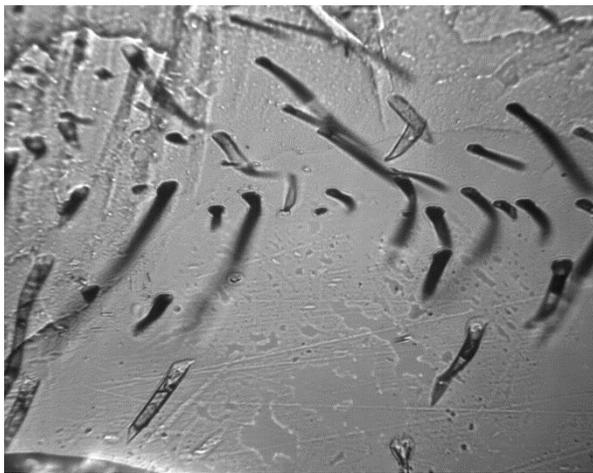
Вес ~ 15.1 кг  
Возраст – не известно  
Место падения с. Мо Тит (в  
середине страны)  
Время падения 21.6.2005

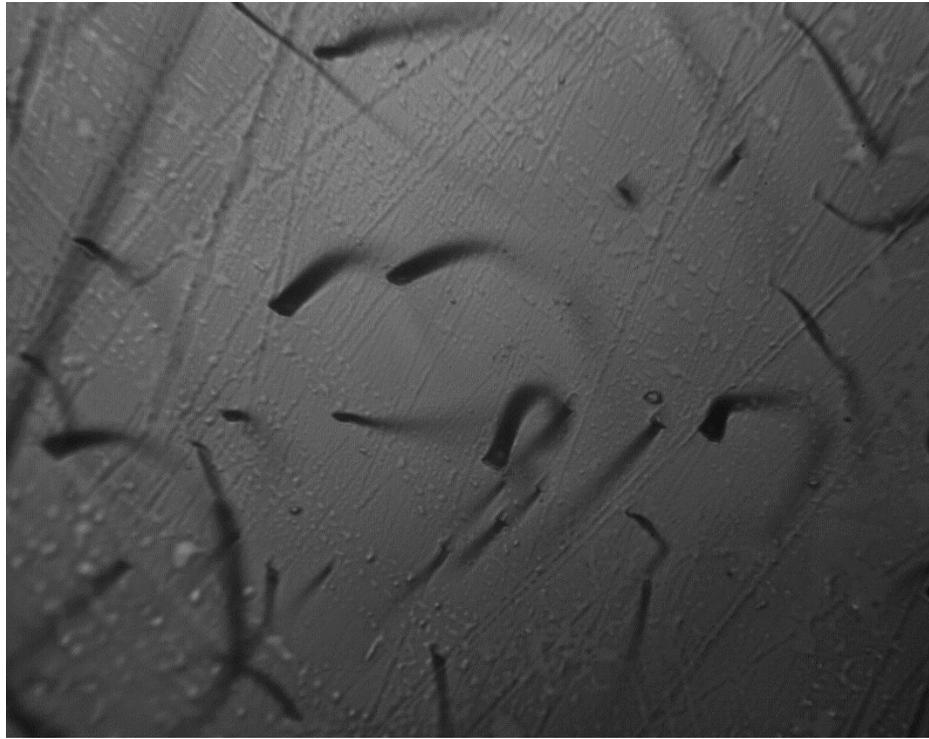
## Метеорит Сеймчан



Вес ~ 60 т (метеоритный дождь)  
Возраст 4 – 4,5 млрд. лет  
Место падения с. Сеймчан  
(Магаданск. обл.)  
Время падения 10 – 100 тыс.  
лет назад .  
Год находки 1967

# Примеры протравленных треков в метеорите Сеймчан





В чём причина такой странной формы протравленных каналов?

Возможный ответ – за счёт нагрева и относительного перемещения слоёв.

1. Нагрев за счёт излучения звезды при пролёте вблизи неё. Но этот нагрев слишком медленный и не приведёт к конвекции слоёв.
2. Нагрев в результате столкновения с другим твёрдым космическим телом. Это событие более быстрое и создаст большой градиент температур.

## ПРИЗНАКИ ЛОКАЛЬНОГО УДАРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ В МЕТЕОРИТЕ СЕЙМЧАН

© 2020 г. Н. Р. Хисина<sup>a, \*</sup>, Д. Д. Бадюков<sup>a, \*\*</sup>, В. Г. Сенин<sup>a</sup>, А. А. Бурмистров<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, ул. Косыгина, 19, Москва, 119991 Россия

<sup>b</sup>Московский энергетический институт, Красноказарменная ул., 14, Москва, 111250 Россия

\*e-mail: khisina@gmail.com

\*\*e-mail: badyukov@geokhi.ru

Поступила в редакцию 10.02.2020 г.

После доработки 18.02.2020 г.

Принята к публикации 25.02.2020 г.

Палласит Сеймчан содержит три морфологических типа оливиновых зерен, которые находятся в FeNi матрице и имеют округлую, угловатую и осколочную форму. Иногда округлые зерна образуют агрегаты – кластеры. Структура и минералогические особенности оливинового кластера в палласите Сеймчан исследованы методами оптической микроскопии, EMPA и SEM. Полученные данные свидетельствуют о наложенном импактном событии в истории Сеймчана, которое привело к локальному плавлению изначально угловатых зерен оливина и прилегающих областей вмещающего FeNi металла. Локальный характер образования ударных расплавов объясняет причину сосуществования в палласитах трех морфологических типов оливина. Морфология оливиновых зерен в кластере свидетельствует о явлении коалесценции капель оливинового расплава, находившихся в

Пространственно-хаотический характер распространения ударной волны и неоднородный нагрев вещества при прохождении ударной волны способствуют локальному плавлению в участках вещества на границах между фазами, имеющими разную плотность.

В результате происходит перемещение слоёв оливина и искривление треков.

Важное значение имеет то, что остывание происходит крайне медленно, скорость остывания в космическом пространстве составляет около 20 градусов за миллион лет.

Полученные авторами из ГЕОХИ данные свидетельствуют о наложенном импактном событии в истории Сеймчана. При соударении высвобождается огромное количество кинетической энергии, часть которой конвертируется в тепловую энергию.

## **V. Анализ характеристик высокочувствительной ядерной фотоэмульсии для разработки оптимальной технологии ее приготовления.**

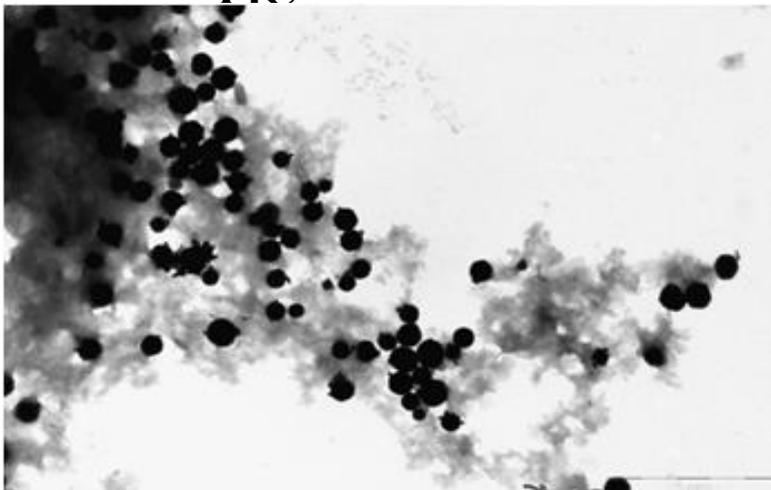
Проблема существования и регистрации частиц темной материи – одна из важнейших проблем Новой физики. В последние десятилетия проводятся эксперименты по поиску этих частиц, но пока надёжного доказательства их существования нет. Автор настоящей работы является участником двух международных экспериментов, в которых, в частности, предполагается проводить с помощью трековых детекторов поиск частиц тёмной материи – SHiP и NEWSdm. В состав аппаратуры этих экспериментов входят детекторы на основе ядерных фотоэмульсий, в том числе, производимых российской компанией ОАО «АВК Славич».

Начиная с 2012 года на ОАО «АВК Славич» (г.Переяславль-Залесский) проводились поисковые работы по восстановлению оптимальной технологии производства эмульсии. Для этого необходимо иметь представление о связи гранулометрических характеристик эмульсии с изменениями в технологии производства.

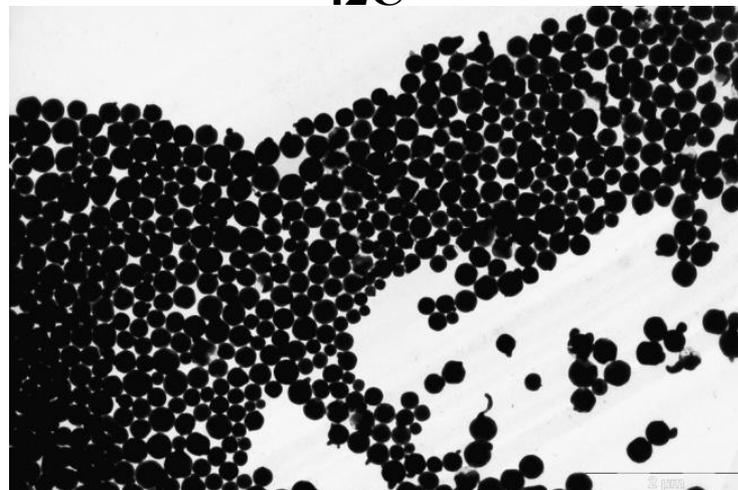
Одними из наиболее важных показателей качества являются гранулометрические характеристики зёрен AgBr, в частности, размеры зерен AgBr, а также их однородность по размерам и форме которые требуют измерения.

Оценка этих показателей автором производится по микрофотографиям углеродных реплик не облучённой и не проявленной эмульсии, полученным с помощью электронного микроскопа.

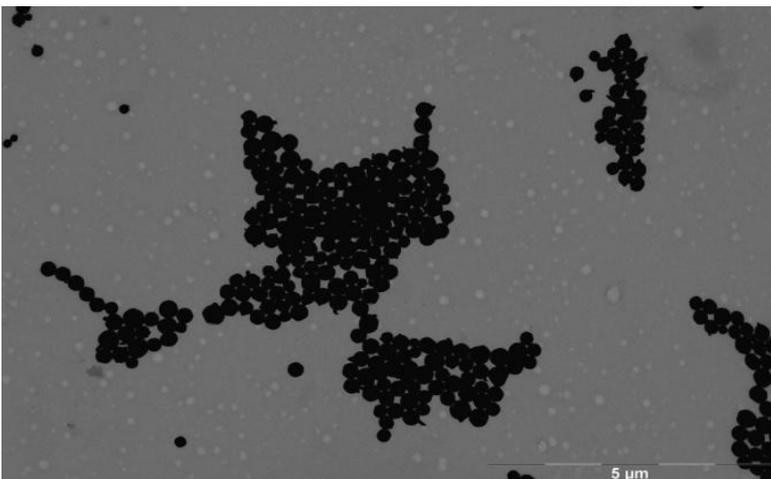
14С



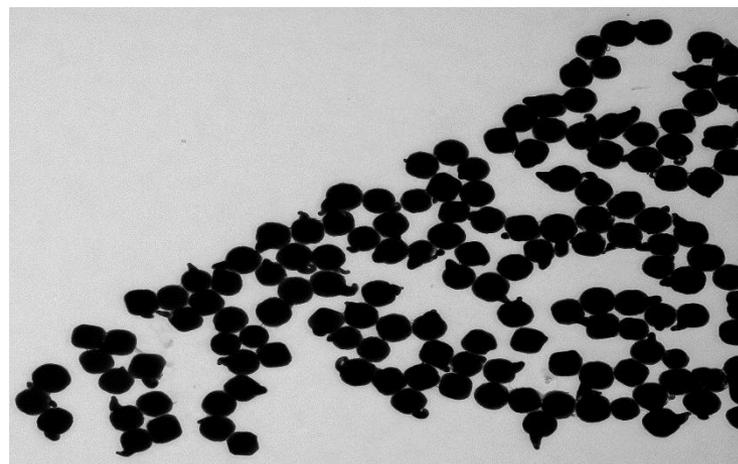
42С



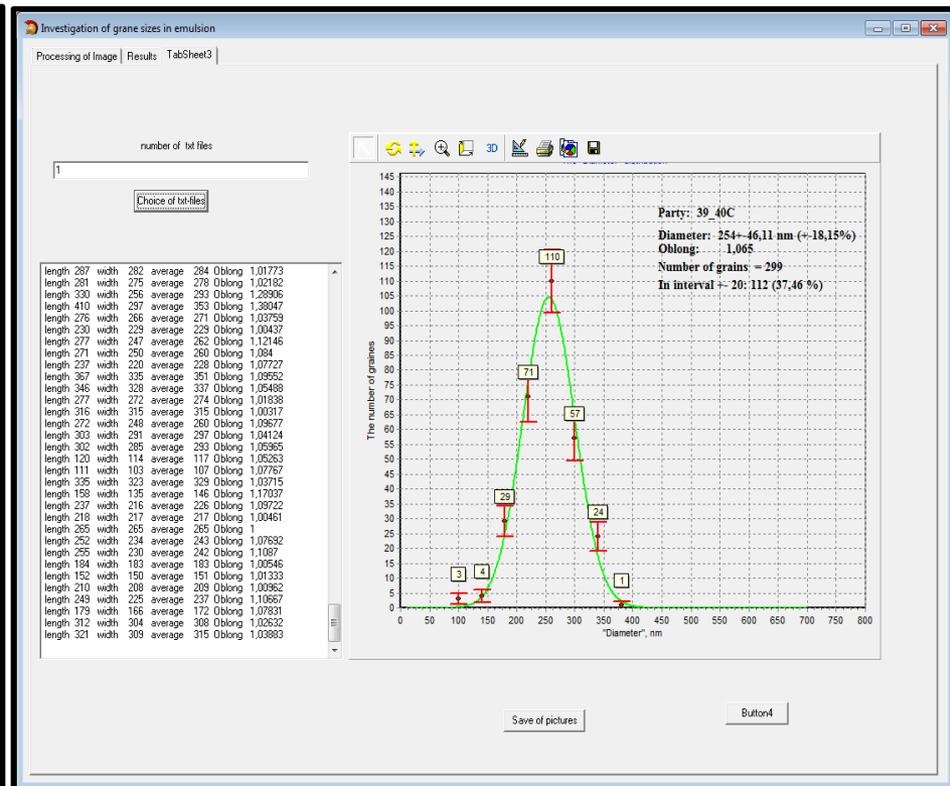
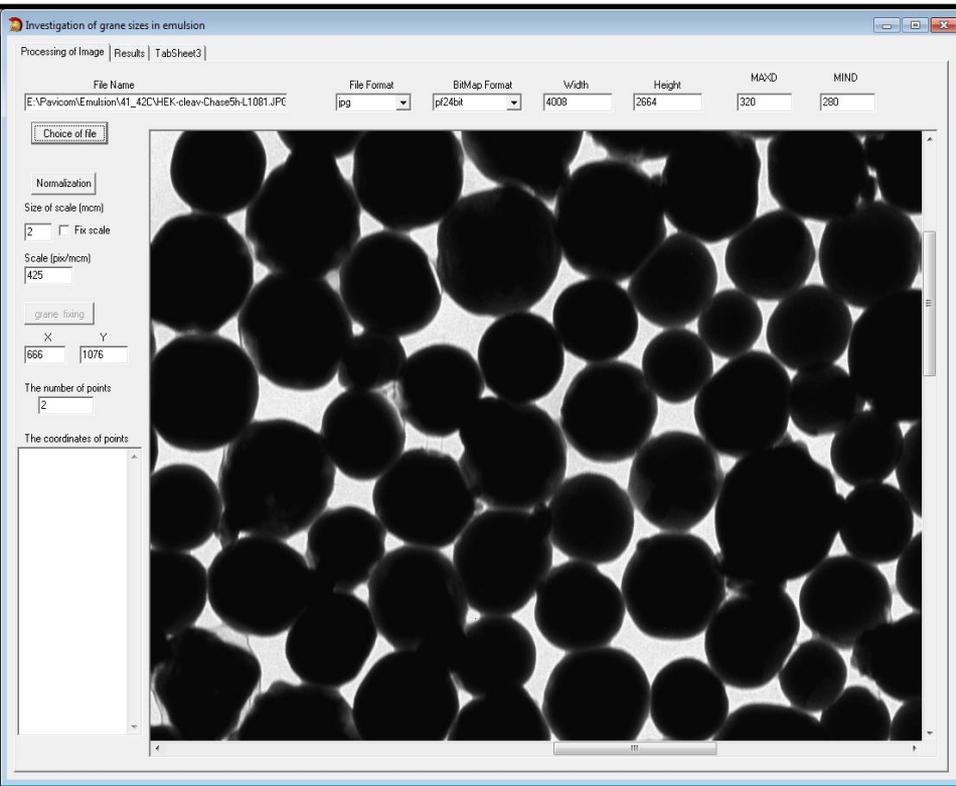
608



Фуджи



Образцы микрофотографий микрокристаллов эмульсии (AgBr) ОАО «Славич» трёх партий приготовления (номер партии соответствует этапу разработки технологии) и для сравнения микрофотография зёрен эмульсии из Японии фирмы «Фуджи». Увеличение 15000 раз.

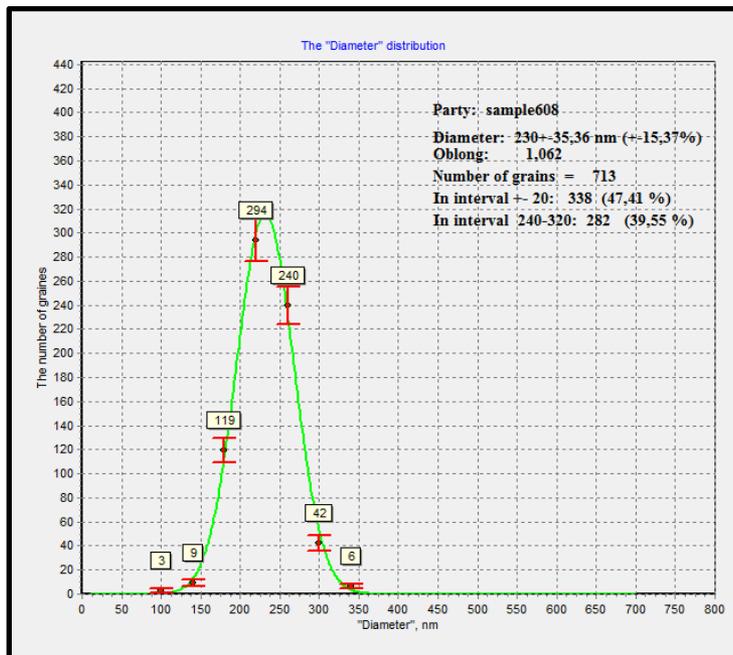


## Окно программы с изображением зёрен эмульсии партии С40

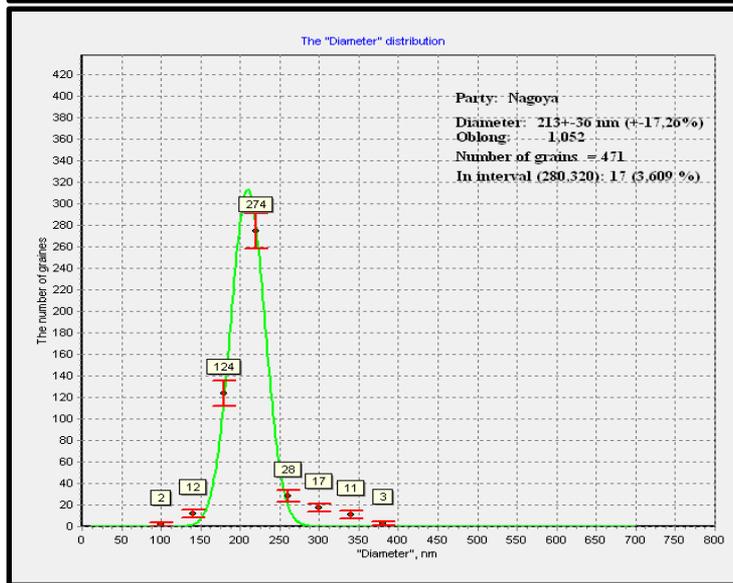
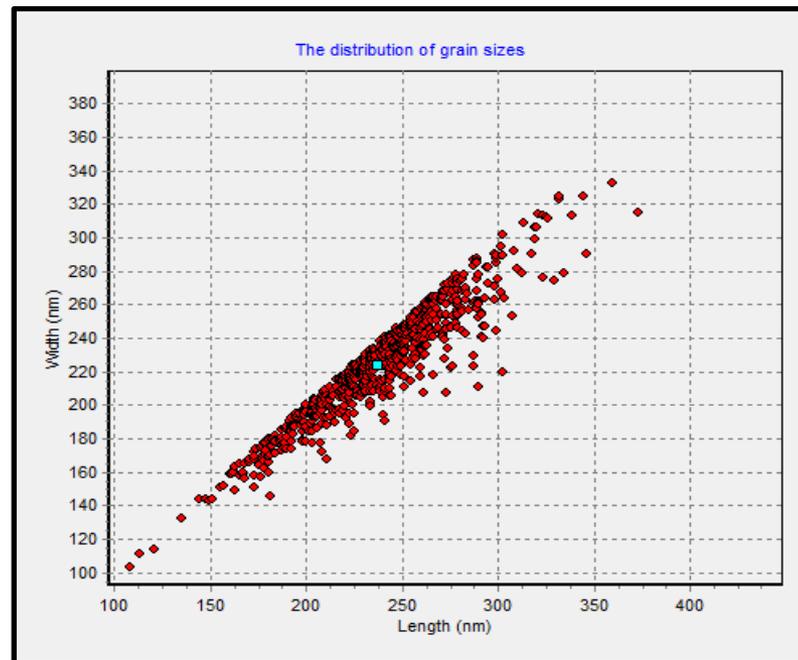
## Распределение размера зёрен

Одна из важнейших характеристик эмульсии – размер микрокристаллов.

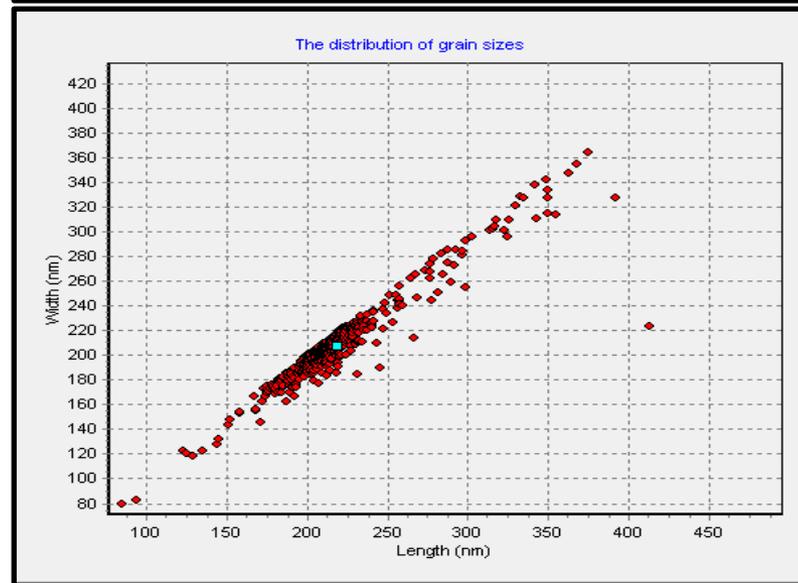
Для автоматизации обработки автором диссертации была разработана программа выделения на изображении отдельных зёрен эмульсии и определения их характеристик. Оператор шаг за шагом выбирает зерно и отмечает два его размера (длина и ширина), которые запоминаются. По окончании обработки зёрен программа вычисляет средние величины ширины и длины, а также среднее отношения длины и ширины (вытянутость - oblong). Результаты по каждому образцу приводятся в виде распределений и средних величин.



608



Нагоя



Партия	Количество измеренных МК	Средний диаметр D, нм	$\Delta D$ , нм	Вытянутость (L/W)	Чувствительность (количество зёрен на 100 мкм пробега)
NE Nagoya	654	229	22	1,12	35
12C	1564	330	54	1,257	22
14C	861	315	59	1,393	22
17C	591	302	52	1,29	21
18C	1162	289	51	1,309	22
28C	677	266	61	1,09	20
32C	705	297	52	1,064	22
<b>38C</b>	<b>2199</b>	<b>242</b>	<b>48</b>	<b>1,066</b>	<b>32</b>
42C	1445	250	50	1,07	25
<b>608</b>	<b>713</b>	<b>230</b>	<b>35</b>	<b>1,06</b>	<b>30-34</b>

Российская ядерная фотоэмульсия в настоящее время широко используется в экспериментах по ядерной физике, физике элементарных частиц, мюонной радиографии и других работах. Авторские методики работы с ядерной фотоэмульсией при оценке ее качества успешно применяются в исследованиях на ускорителях элементарных частиц - для эмульсионных детекторов экспериментов SHiP, SND@LHC, NEWSdm. Участие автора настоящей работы в этих экспериментах заключается в предварительной проверке качества эмульсии.

# VI. Результаты работы

1. Получены данные о зарядовом составе около 26000 ядер ГКЛ с зарядом  $> 40$ , в том числе более 22000 с  $Z > 55$ , которые согласуются с данными других экспериментов. Результаты работы являются весомым вкладом в мировую статистику экспериментов по поиску сверхтяжелых ядер в природе. Зарегистрировано три ядра, заряд которых оценивается как  $119_{-6}^{+10}$ , оцененное время жизни этих сверхтяжелых ядер – минимум, десятилетия - на много порядков превышает время жизни трансфермиевых ядер, синтезированных на ускорителях. Полученные результаты являются аргументами в пользу теоретической гипотезы о существовании острова стабильности трансфермиевых природных ядер.
2. Разработаны алгоритмы и созданы программы на языке C++ для автоматизированного анализа и идентификации следов частиц в трековых детекторах.
3. Исследовано влияние отжига треков на зарядовый спектр ядер космических лучей по результатам измерений в оливинах из метеоритов.
4. Проведен анализ фрагментации сверхтяжёлых ядер при их прохождении через вещество метеорита.
5. Изучена радиационная история палласитов по данным трекового анализа.
6. Проведен анализ возможных причин возникновения треков особой формы в оливинах из метеоритов.
7. Проведён анализ особенностей треков в метеорите Сеймчан.
8. На основе программных пакетов для автоматизированной обработки изображений в кристаллах оливинов создано программное обеспечение для оценки качества ядерной фотоэмульсии и обработки изображений зёрен AgBr полученных на электронном микроскопе.

# VII. Публикации

- Опубликовано 27 печатных работ, 25, входящих в базы данных Scopus, Web Of Science и ВАК.
- WOS-9 , Scopus-10 , ВАК – 6.
- 4 работы в виде препринтов .

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. А.С.Барабаш, В.Я.Браднова, В.В.Дубиница, Н.П.Егоренкова, С.И.Коновалов, Е.А.Пожарова, Н.Г.Полухина, В.А.Смирнитский, Н.И.Старков, **Тан Найнг Со**, В.И.Юматов, М.М.Чернявский//Определение точности измерения энергии заряженных частиц по их пробегу в ядерной фотоэмульсии// Журнал«Краткие сообщения по физике»**2012**,№ 10,стр.35-42.
2. В.Д. Ашитков, А.С. барабаш, В.Я. Браднова, Л.А. Гончарова, О.И. Орурк, Е.А. Пожарова, Н.Г. Полухина, В.А. Смирнитский, Н.И.Старков, **Тан Найнг Со**, В.И.Юматов//Результаты разработки методики использования ядерной фотоэмульсии для эксперимента по поиску двойного безнейтринного бета-распада//Журнал«Краткие сообщения по физике»**2013**,№ 12,стр.49-61.
3. А.В.Багуля, М.С.Владимиров, А.Е.Волков, Л.А.Гончарова, С.А.Горбунов, Г.В..Калинина, Н.С.Коновалова, Н.М.Окатьева, Т.А.Павлова, Н.Г.Полухина, Н.И.Старков,**Тан Найнг Со**, М.М.Чернявский,Т.В.Щедрина//Зарядовый спектр сверхтяжелых ядер галактических космических лучей, полученный в эксперименте Олимпия// Журнал«Краткие сообщения по физике»**2015**, № 5,стр.49-56
4. А.В. Aleksandrov, A.V. Bagulya, M.M. Chernyavsky, V.I. Galkin, L.G. Dedenko, N.V. Fomenko, N.S. Konovalova, G. De Lellis, A.K. Managadze, O.I. Orurk, N.G. Polukhina, T.M. Roganova, T.V. Shchedrina, C. Sirignano, N.I. Starkov, **Than Naing Soe**, V.E. Tioukov, M.S. Vladimirov, S.G. Zemskova//Test Experiments on muon radiography with emulsion track detectors in Russia// Physics of Particles and Nuclei Letters, **2015**, Vol. 12, No. 5, pp. 713–719.

5. A.V. Bagulya, M.M. Chernyavsky, L. A. Goncharova, G.M. Granich, M.V.Gorshenkov, G. V. Kalinina, N. S. Konovalova<sup>1</sup>, N. M. Okateva, T.A. Pavlova, N. G. Polukhina, T.V. Shchedrina<sup>1</sup>, E.S.Savchenko<sup>4</sup>, N. I. Starkov, **Than Naing Soe**, M.S.Vladymyrov//Charge distribution of Superheavy Elements in Galactic Cosmic Rays on base of Investigations in Olivine Crystals from Meteorites//AIP Conference Proceedings, volume 1702.Issue 1, AIP Conference Proceedings 1702, 110005 (2015)
6. Victor Alexeev, Alexander Bagulya, Mikhail Chernyavsky, Alexei Gippius, Lyudmila Goncharova, Sergei Gorbunov, Mikhail Gorshenkov, Galina Kalinina, Nina Konovalova, Jie Liu, Pengfei Zhai, Natalia Okatyeva, Tatyana Pavlova, Natalia Polukhina, Nikolai Starkov, **Than Naing Soe**, Christina Trautmann, Elena Savchenko, Tatyana Shchedrina, Alexander Vasiliev, and Alexander Volkov// Charge Spectrum of Heavy and superheavy components of galactic cosmic rays results of the OLIMPIYA experiment// The Astrophysical Journal, 829(2):120 (18pp), 2016 October 1.
7. В. В. Дубинина, Н. П. Егоренкова, А. С. Кобякин, Е. А. Пожарова, Н. Г. Полухина, В. А. Смирнитский, Н. И. Старков, **Н. С. Тан**, М. М. Чернявский, Т. В// Применение ядерной фотоэмульсии для поиска легкой темной материи// Журнал«Краткие сообщения по физике»2016, № 4, стр.52-58.
8. В.А.Алексеев, А.В.Багуля, А.Е.Волков,А.А.Гиппиус, Л.А.Гончарова, С.А.Горбунов, Г.В..Калинина, Н.С.Коновалова, Н.М.Окательева, Т.А.Павлова, Н.Г.Полухина, Н.И.Старков,**Тан Найнг Со**, М.М.Чернявский,Т.В.Щедрина//Поиск Острова стабильности сверхтяжёлых ядер с помощью природных трековых детекторов// Журнал«Краткие сообщения по физике»2017, № 11,стр.41-47

9. В. А. Алексеев, А. В. Багуля, А. Е. Волков, А. А. Гиппиус, Л. А. Гончарова, С. А. Горбунов, В. М. Грачев, А. Б. Дашкина, Г. В. Калинина, Н. С. Коновалова, Н. М. Окатьева, Т. А. Павлова, Н. Г. Полухина, Н. И. Старков, **Тан Найнг Со**, М. М. Чернявский, Т. В. Щедрина//Изучение радиационной истории палласитов методом трекового анализа// Журнал«Краткие сообщения по физике»2019, № 8,стр.15-22
10. A. B. Aleksandrov , V. A. Alekseev , A. V. Bagulya , A. B. Dashkina ,M. M. Chernyavskiy , A. A. Gippius a , L. A. Goncharova ,S. A. Gorbunov , V. M. Grachev g, G. V. Kalinina e , N. S. Konovalova ,N. M. Okateva , T. A. Pavlova , N. G. Polukhina ,N. I. Starkov , **T. N. Soe** , T. V. Shchedrina , and A. E. Volkov // Determination of Charges of Superheavy Nuclei in Finding them in Nature// Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2019, Vol. 46, No. 12, pp. 383-386
11. **Than Naing Soe**, N. Poluhina , and N. Starkov// Investigation of the Features of Etched Tracks of Superheavy Nuclei in Olivines from Meteorites // Physics of Atomic Nuclei, 2020, Vol. 83, No. 9, pp. 1297–1303.
12. A. B. Alexandrova, A. V. Bagulya, A. E. Volkova, A. A. Gippiusa, L. A. Goncharovaa,S. A. Gorbunova, V. M. Gracheve, G. V. Kalininaf, N. S. Konovalovaa, N. M. Okatevaa,T. A. Pavlovaf, N. G. Polukhinaa, N. I. Starkova, **Than Naing Soe**, M. M. Chernyavskiiia, and T. V. Shchedrinaa// Anomaly of the Charge Spectrum of Galactic Cosmic Ray Nuclei in Olivines as Evidence of Meteorite Radiation History// Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2020, Vol. 47, No. 12, pp. 381–384.
13. **Than Naing Soe**, N. G. Polukhina & N. I. Starkov//Algorithm for Determining the Thickness of the Cut Olivine Layer when Determining Charges of Galactic Nuclei//Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2021, volume 48, pp.131–134.

14. Г.В.Калинина , **Тан Найнг Со**, Н.И. Старков// Аномалия в спектре ядер галактических космических лучей в оливинах из метеоритов// Ядерная физика, 2021, том 84,№6, стр. 490–495.
15. **Than Naing Soe**, N. G. Polukhina, and N. I. Starkov//Investigation of Dynamics of Heat Propagation in Meteorite Matter and Its Influence on Geometric Features of Tracks of Nuclei in Olivine Crystals from Meteorites// Physics of Atomic Nuclei, 2021, Vol. 84, No. 5, pp. 643–648.
16. **Тан Найнг Со**, Полухина Н.Г, Старков Н.И//Роль ядерного канала взаимодействий при прохождении тяжелых ионов через оливин//Журнал«Краткие сообщения по физике»2021, № 12,стр.42-48.
17. Алексеев В.А., Багуля А.В., Волков А.Е., Гончарова Л.А., Горбунов С.А., Калинина Г.В.1, Коновалова Н.С., Окатьева Н.М., Павлова Т.А., Полухина Н.Г., Старков Н.И., **Тан Найнг Со**, Чернявский М.М., Щедрина Т.В.//Изучение следов сверхтяжелых ядер галактических космических лучей в оливинах палласитов трековым методом//Труды ВЕСЭМПГ-2017, стр.180-183.
18. Alexeev V.A., Bagulya A.V., Volkov A.E., Goncharova L.A., Gorbunov S.A., Kalinina G.V.1, Konovalova N.S., Okateva N.M., Pavlova T.A., Polukhina N.G., Starkov N.I., **Than Naing Soe**, Chernyvsky M.M., Shchedrina T.V.//The track studies of olivine crystals in the pallasites//Problems of Planetology, Cosmochemistry and Meteoritica//Institute of Experimental Mineralogy//Experiment in Geosciences 2018,Volume 24 N 1,стр.6-9.

19. Y. Suzuki, S. Takahashi, N. Starkov, **S. Than Naing**, C. Ahdida, R. Albanese, A. Alexandrov, A. Anokhina, S. Aoki, G. Arduini, E. Atkin, N. Azorskiy, F. Baaltasar Dos Santos J.J. Back, V. Bayliss G. Bencivenni Y.A. Berdnikov, A.Y. Berdnikov, I. Berezkina//Sensitivity of the SHiP experiment to Heavy Neutral Leptons//journal of high energy physics, 2019. Vol. 1904. No. 77. JHEP 04 2019 077, <https://arxiv.org/abs/1811.00930>
20. S. Takahashi<sup>1</sup>, J.L. Tastet, P. Teterin, **S. Than Naing**, I. Timiryasov, V. Tioukov, D. Tommasini<sup>44</sup>, M. Torii, N. Tosi, D. Treille, R. Tsenov, S. Ulin et al., //The experimental facility for the Search for Hidden Particles at the CERN SPS, Journal of Instrumentation (JINST), 2019, Volume 14, P03025, DOI 10.1088/1748-0221/14/03/P03025
21. Y. Suzuki, S. Takahashi, J.L. Tastet, P. Teterin, **S. Than Naing**, I. Timiryasov, V. Tioukov, D. Tommasini, M. Torii, N. Tosi, D. Treille, R. Tsenov, S. Ulin, A. Ustyuzhanin, Z. Uteshev et al., //Fast simulation of muons produced at the SHiP experiment using Generative Adversarial Networks, Journal of Instrumentation (JINST), 2019, Volume 14, P11028, DOI 10.1088/1748-0221/14/11/P11028 .
22. M.E. Stramaglia, D. Sukhonos, Y. Suzuki, S. Takahashi, J.L. Tastet, P. Teterin, **S. Than Naing**, I. Timiryasov, V. Tioukov, D. Tommasini, M. Torii, N. Tosi, D. Treille et al., //The Magnet of the Scattering and Neutrino Detector for the SHiP experiment at CERN, Journal of Instrumentation, Volume 15, January 2020, P01027 , <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/15/01/P01027>
23. S. Takahashi, J. L. Tastet, P. Teterin, **S. Than Naing**, I. Timiryasov, V. Tioukov, D. Tommasini, M. Torii, N. Tosi et al., // Measurement of the muon flux from 400 GeV/c protons interacting in a thick molybdenum tungsten target// The European Physical Journal C volume 80, Article number: 284 (2020) // <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-7788-y>

24. A. Sokolenko, E. Solodko, N. Starkov, L. Stoel, M.E. Stramaglia, D. Sukhonos, Y. Suzuki, S. Takahashi, J.L. Tastet, P. Teterin, **S. Than Naing**, I. Timiryasov, V. Tioukov et al.//Sensitivity of the SHiP experiment to dark photons decaying to a pair of charged particles// Eur. Phys. J. C (2021) 81: 451//<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-09224-3>
25. A. Sokolenko, E. Solodko, N. Starkov, L. Stoel, M.E. Stramaglia, D. Sukhonos, Y. Suzuki, S. Takahashi, J.L. Tastet, P. Teterin, **S. Than Naing**, I. Timiryasov, V. Tioukov, D. Tommasini, M. Torii//Sensitivity of the SHiP experiment to light dark matter//Journal of High Energy Physics volume 2021, Article number: 199 (2021)// DOI: [10.1007/JHEP04\(2021\)199](https://doi.org/10.1007/JHEP04(2021)199)
26. J.L. Tastet, P. Teterin, **S. Than Naing**, I. Timiryasov, V. Tioukov, D. Tommasini, M. Torii, N. Tosi, D. Treille, R. Tsenov, S. Ulin, et al.//Track reconstruction and matching between emulsion and silicon pixel detectors for the SHiP-charm experiment// Journal of Instrumentation, Volume 17, March 2022//<https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/03/P03013>
27. П. А. Бабаев , А. В. Багуля , А. Е. Волков , С. А. Горбунов , Г. В. Калинина , Н. С. Коновалова , Н. М. Окатьева , Н. Г. Полухина , Ж. Т. Садыков , Н. И. Старков , Е. Н. Старкова , **Тан Найнг Со** , М. М. Чернявский , Т. В. Щедрина//ОЦЕНКА ЭФФЕКТА ФРАГМЕНТАЦИИ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ПАЛЛАСИТАХ//ЖЭТФ, 2022, том 161, вып. 4, стр. 610–615

# Препринты

28. A. Alexandrov V. Alexeev, A. Bagulya, A. Dashkina, M.Chernyavsky, A. Gippius,a L. Goncharova S. Gorbunov, V.Grachev,f G. Kalinina,d N. Konovalova,a N. Okateva,T.Pavlova, N. Polukhina, R. Rymzhanov, N. Starkov, **T.N. Soe**, T. Shchedrina, and A. Volkova//Natural superheavy nuclei in astrophysical data// arXiv:1908.02931 [nucl-ex]
29. M.E. Stramaglia, D. Sukhonos, Y. Suzuki, S. Takahashi, J.L. Tastet, P. Teterin, **S. Than Naing**, I. Timiryasov, V. Tioukov, D. Tommasini, M. Torii, N. Tosi, D. Treille, R. Tsenov etal., // Measurement of the muon flux for the SHiP experiment // arXiv:2001.04784 [physics.ins-det]
30. A. Sokolenko , E. Solodko , N. Starkov , L. Stoel , M.E. Stramaglia , D. Strekalina , D. Sukhonos , Y. Suzuki , S. Takahashi , J.L. Tastet , P. Teterin, **S. Than Naing** , I. Timiryasov , V. Tioukov, D. Tommasini , M. Torii , N. Tosi, F. Tramontano, D. Treille, R. Tsenov, S. Ulin , E. Ursov, A. Ustyuzhanin, Z. Uteshev, G. Vankova-Kirilova, F. Vannucci etal., //SND@LHC [//arxiv.org/abs/2002.08722](https://arxiv.org/abs/2002.08722)
31. E. Solodko, N. Starkov , L. Stoel, M.E. Stramaglia, P. Teterin, **Than Naing Soe**, I. Timiryasov, V. Tioukov, D. Tommasini, M. Torii, N. Tosi, D. Treille, R. Tsenov, S. Ulin, E. Ursov, A. Ustyuzhanin, Z. Uteshev etal., //The SHiP experiment at the proposed CERN SPS Beam Dump Facility// arXiv:2112.01487v1 [physics.ins-det] 2 Dec 2021

## VIII. Апробация работы

1. A.V. Bagulya, M.M. Chernyavsky, L. A. Goncharova, G. V. Kalinina, N. S. Konovalova, N. M. Okat'eva, T.A. Pavlova, N. G. Polukhina, N. I. Starkov, **Than Naing Soe**//Search for Superheavy Elements in Galactic Cosmic Rays //International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering (ICCMSE 2015, Athens, Greece, March 20-23, 2015)
2. POLUKHINA, Natalia , VOLKOV, Alexander; SHCHEDRINA, Tatyana ; STARKOV, Nikolai; **SOE, ThanNaing** ; VLADYMYROV...//A study of the composition of galactic cosmic rays based on meteorite olivine data//SHIM 2015 (Swift heavy ions in matter conference, May 18-21,2015,Darmstadt,Germany.
3. Н.Г.Полухина, Н.И.Старков, А.Б. Александров, Н.М.Окатьева, Л.А. Гончарова,**Тан Найнг Со** // ПОИСК ТРЕКОВ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В КРИСТАЛЛАХ ОЛИВИНА ИЗ МЕТЕОРИТОВ//XVI Международная конференция "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле",28 сентября 2015 г., ГЕОХИ им. В.В. Вернадского.
4. A.V. Bagulya, M.M. Chernyavsky, L. A. Goncharova, G. V. Kalinina, N. S. Konovalova, N. M. Okat'eva, T.A. Pavlova, N. G. Polukhina, N. I. Starkov, **Than Naing Soe**, M.S.Vladymyrov, A.E.Volkov//Search for Nuclei of Galactic Cosmic-Ray Superheavy elements in olivine crystals from meteorites//18<sup>th</sup> international conference on Radiation Effects In Insulators(REI-18,Jaipur,Rajasthan,India October 26 to 31,2015), Proceedings, page 17.

5. 13th SHiP Collaboration meeting, 14 - 16 March 2018, CERN, Geneva, Switzerland.
6. **Тан Найнг Со**//Исследование особенностей протравленных треков сверхтяжёлых ядер в оливинах из метеоритов//13-е Черенковские чтения "Новые методы в экспериментальной ядерной физике и физике частиц",14 апреля 2020 г, ФИАН, Москва.
7. Andrey Alexandrov, Victor Alexeev, Alexander Bagulya, Aigerim Dashkina, Mikhail Chernyavsky, Alexei Gippius, Lyudmila Goncharova, Sergei Gorbunov, Victor Grachev, Galina Kalinina, Nina Konovalova, Tatiana Pavlova, Ruslan Rymzhanov, Nikolai Starkov, **Than Naing Soe**, Tatiana Shchedrina, Alexander Volkov and Natalia Polukhina//Investigations of the tracks of galactic cosmic ray nuclei in olivines from meteorites //43rd COSPAR scientific assembly, International convention centre, 28.1.2021-4.2.2021 Sydney, Australia.
8. **Тан Найнг Со**//Аномалия зарядового спектра ядер галактических космических лучей в оливинах // Одиннадцатые Зацепинские Чтения, 28 Май 2021, ИЯН РАН, Москва.
9. **Тан Найнг Со** //Зарядовый спектр тяжелых и сверхтяжелых ядер галактических космических лучей по результатам измерений в оливинах из метеоритов //Семинар отдела космических излучений,29 марта 2022, ОЯФА ФИАН,Москва
10. **Тан Найнг Со** //Методика поиска и исследования треков тяжелых и сверхтяжелых ядер галактических космических лучей по результатам измерений в оливинах из метеоритов// Семинар,6 апреля 2022, ОИЯИ,Дубна.

## **Официальные оппоненты**

**КАРПОВ Александр Владимирович**, доктор физико-математических наук  
(Объединенный институт ядерных исследований)

**БОЛОЗДЫНЯ Александр Иванович** доктор физико-математических наук,  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный  
университет «МИФИ»,

**МУХАМЕДШИН Рауф Адгамович**, доктор физико-математических наук  
(Институт ядерных исследований Российской академии наук)

### **Ведущая организация**

ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова» НИЦ  
«Курчатовский институт»

Семинар в ОИЯИ по материалам диссертации прошел 6 апреля 2022 года.  
Семинар в ПИЯФ - 14 июня 2022 года.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ







European Organization for Nuclear Research  
*Organisation européenne pour la recherche nucléaire*



Adresse postale / Mailing address\*:

Dr Andrey Goloutvin  
CERN - EP Department  
CH -1211 GENEVA 23

E-mail [Andrey.Goloutvin@cern.ch](mailto:Andrey.Goloutvin@cern.ch)

P.N.Lebedev Physical Institute of RAS,  
53, Leninskiy prospect, 119991, Moscow, Russia  
Chairman of the dissertation council  
D 002.023.04 based on FIAN  
Academician Mesyats G.A.

Geneva, June 8, 2022

Votre reference / Your reference :

Notre reference / Our reference : SHiP-08/06/2022

Subject : on the decisive contribution of Tan Naing Soe to the seven SHiP publications submitted for defense

Dear Professor Mesyats,

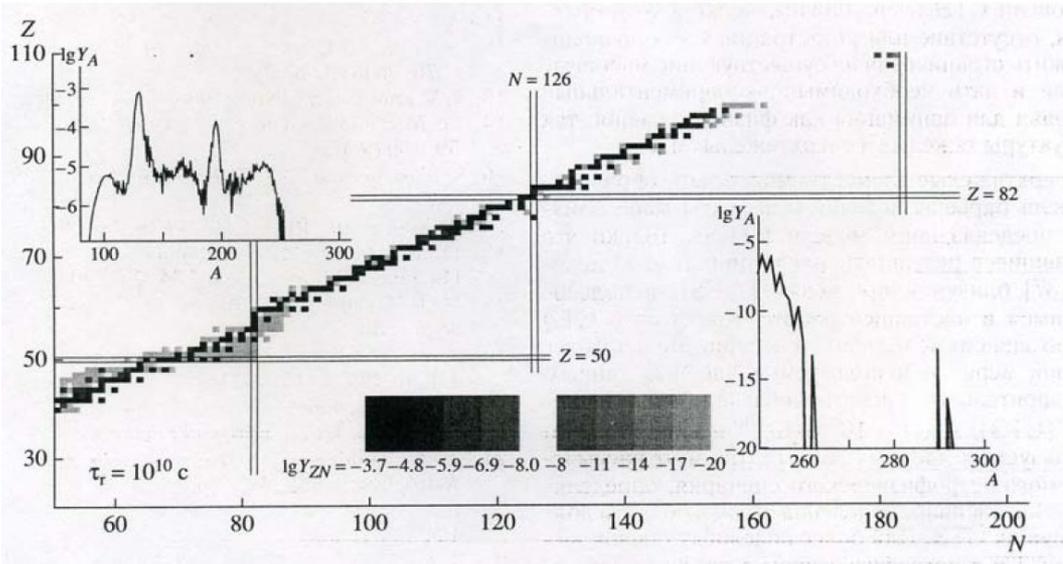
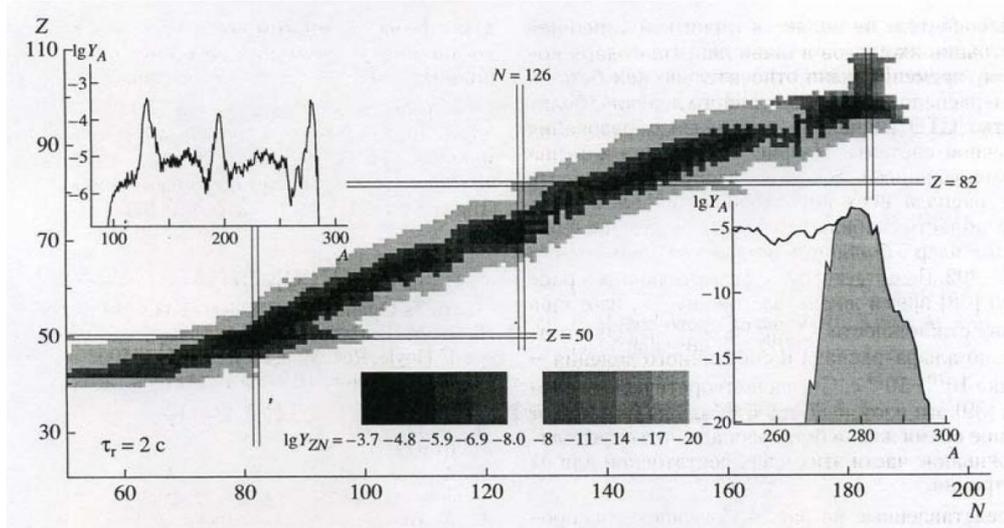
In the SHiP detector, one of the main elements is the neutrino detector, designed, in particular, to study the physics of tau neutrinos. The basic elements of the neutrino detector are emulsion blocks, consisting of a nuclear photographic emulsion produced in Russia, interleaved with tungsten target layers. Therefore, the characteristics of the used Russian nuclear photographic emulsion are a key guarantee of successful measurements. Tan Naing Soe's software for testing emulsion quality in the SHiP experiment provides all the necessary levels of verification before using it on the accelerator in currently implemented test calibrations and measurements. Tan Naing Soe's defining contribution to these seven publications is based on the successful results of the first works on the preparation of our new ambitious project at CERN - Search for Hidden Particles.

Sincerely yours,

Spokesperson of the SHiP experiment

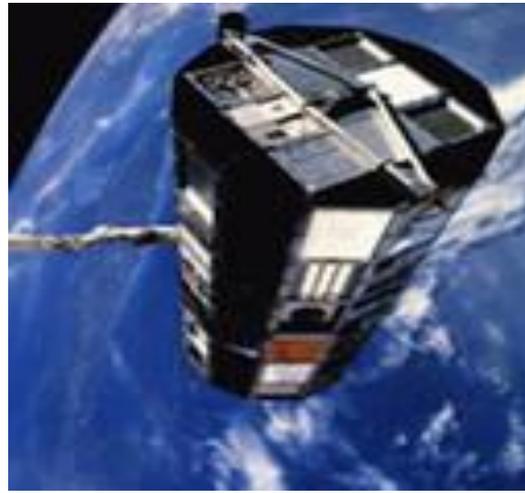
Andrey Goloutvin

# Модель слияния нейтронных звёзд при $\rho=10^{19}$ нейтронов/см<sup>3</sup>



Панов И.В. и др., Ядерная физика, 2009, т. 72, №6, с. 1070.

# Эксперименты по изучению сверхтяжёлых ядер.



Эксперимент TREK проводился на космической станции Мир на высоте 450 км и продолжался более 40 месяцев. Детектор включал 150 стопок, каждая из которых состояла из 16 листов барий-фосфатного стекла (BP-1). После травления было найдено несколько сотен следов, принадлежащих тяжёлым ядрам с  $Z > 70$ .

ПТД сборки, составленные также из пластин лексана, с расположенными между ними пластинами свинца (эксперимент UHCRE - Ultra Heavy Cosmic Ray Experiment) экспонировались на высоте 450 км в течение 69 месяцев на космической станции LDEF. Всего в этом эксперименте было зарегистрировано около 2500 треков, относящихся к ядрам с  $Z > 65$ .

трековый детектор, размещенный на космической станции Skylab, включал 36 камер, каждая из которых состояла из 32 слоёв ПТД лексана, экспонировался на высоте 430 км в течение 253 дней. Идентификация заряда ядер, образующих треки, осуществлялась по величине скорости их травления в пластике.

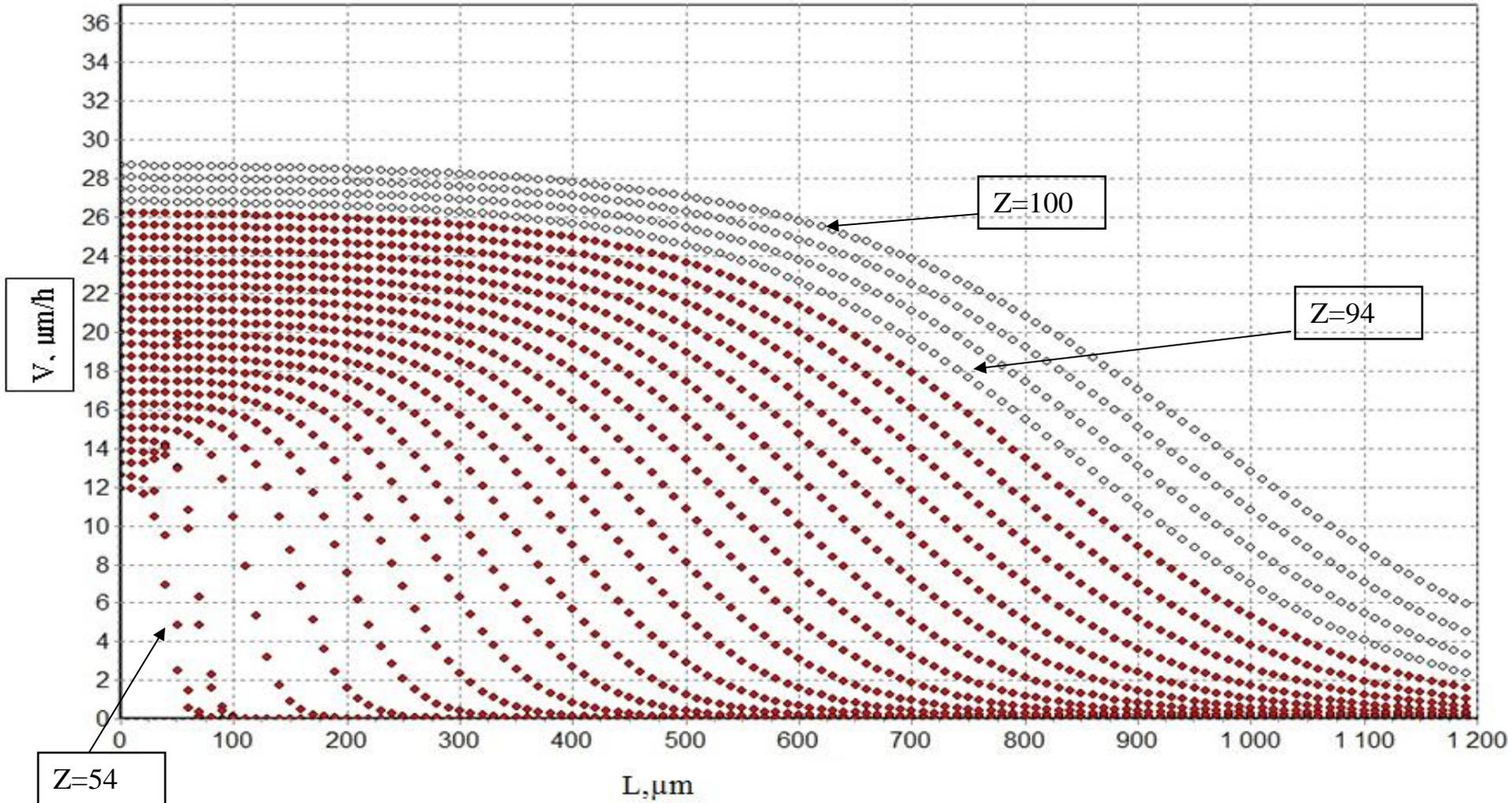
## Кусок метеорита Eagle Station



Метеориты класса палласиты состоят из железо-никелевой "матрицы", в объеме которой имеются включения кристаллов оливина - полупрозрачного минерала жёлтого цвета размером до 1-2 см.

Доступные для обработки кристаллы имеют размер 0,5-2 мм вследствие их растрескивания.

Аналитическая зависимость кривых от характеристик треков позволяет проводить экстраполяцию вблизи ядер урана.



Семейство кривых  $V(L, Z)$  для ядер от  $Z = 54$  до  $Z = 92$  (затемнённые кружки) и от  $Z = 94$  до  $Z = 100$  (незаполненные кружки) с интервалом в две единицы заряда.

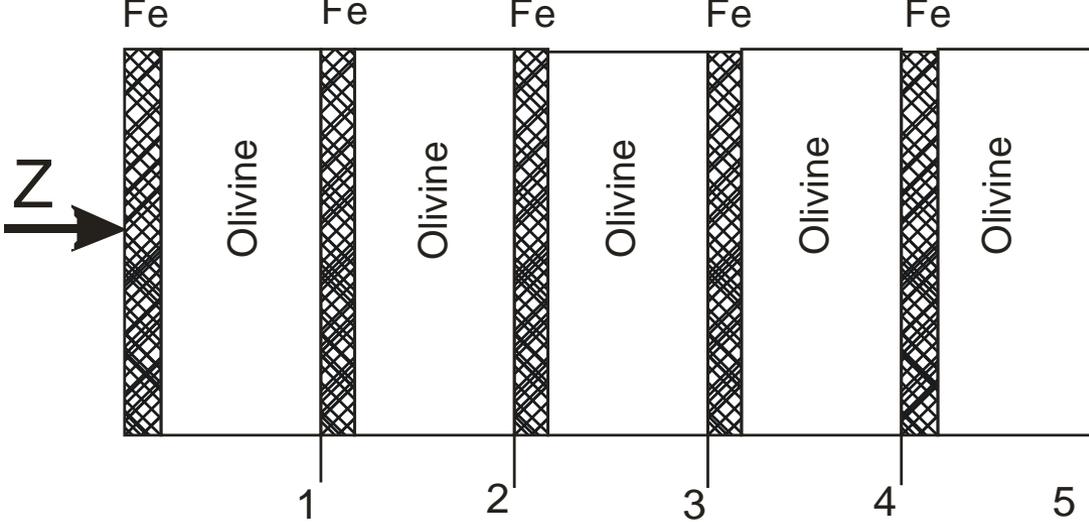
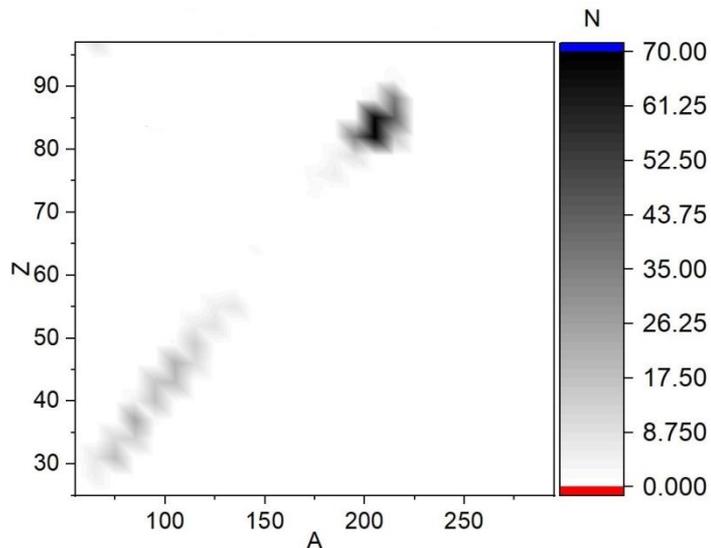


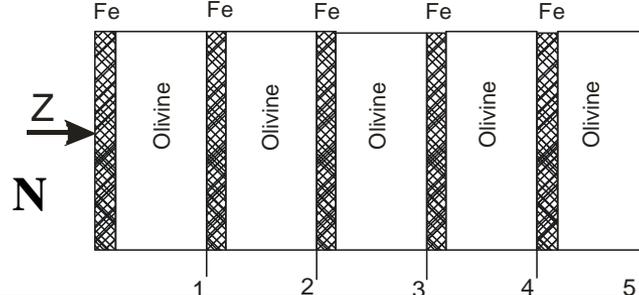
Схема железо-оливиновой сборки, имитирующей структуру палласита



Распределение по заряду и массе фрагментов, образовавшихся в результате взаимодействий ядер свинца, полученное при расчетах для глубины «3»

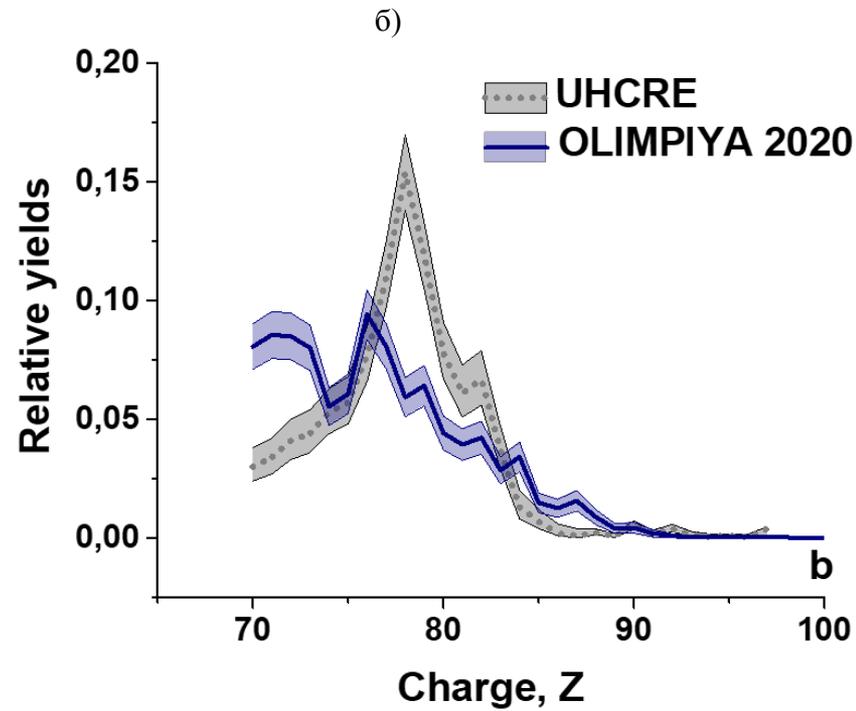
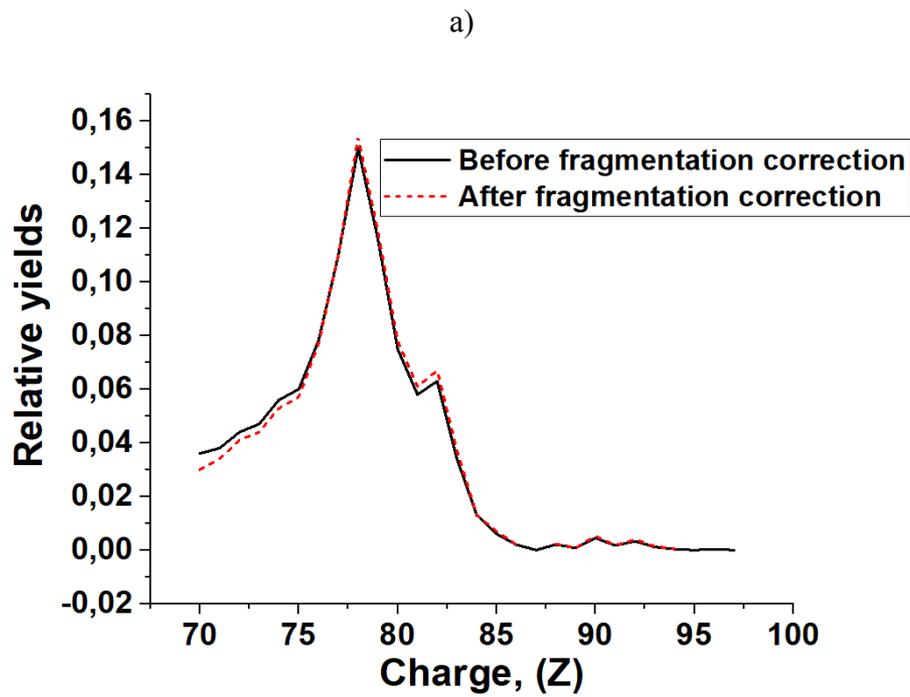
## Модельные расчеты для оценки эффекта фрагментации

Следует отметить, что большая часть тяжёлых фрагментов урана и свинца имеют заряд меньше  $Z=53$ . Это означает, что они выходят за пределы эффективной регистрации ядер рассматриваемой методикой, т.е. возникающие неупругие ядерные каналы в этом случае приводят к потере регистрируемых ядер. С другой стороны, часть фрагментов вольфрама и свинца, испытывающие перезарядку или подхват, включаются в общее распределение зарядов и слегка "размывают" его.



Глубина (номер на рисунке )	1	2	3	4	5
Энергия налетающего ядра, ГэВ/А	0,8	1,1	1,4	1,7	2
Доля неупругих ядерных событий, %	5	11	20	32	48
Число дошедших ядер		100	50	40	20
Число фрагментировавших ядер		11	10	12	10
Число зарегистрированных ядер		89	40	28	10

Для того, чтобы ядро урана дошло до соответствующего уровня с энергией 500 МэВ/нуклон, оно должно иметь энергию, показанную в таблице. Доля неупругих ядерных событий показана во второй строке. Энергетический спектр убывает с энергией, и число ядер, дошедших до более глубокого уровня будет убывать. Так, если при некотором исходном числе ядер  $N$  до уровня 2 дойдёт 100 ядер, то при том же исходном числе ядер  $N$  до уровней 3, 4 и 5 дойдёт 50, 40 и 20 соответственно. Тогда в соответствии с таблицей на 2-ом уровне фрагментирует 11 ядер, а на 3-ем, 4-ом и 5-ом 10, 12 и 10, соответственно. Таким образом, из 210 ядер дошедших до уровней со 2-го до 5-го будет зарегистрировано 167 и фрагментирует 43. То есть потери за счёт фрагментации составляют около 20%.

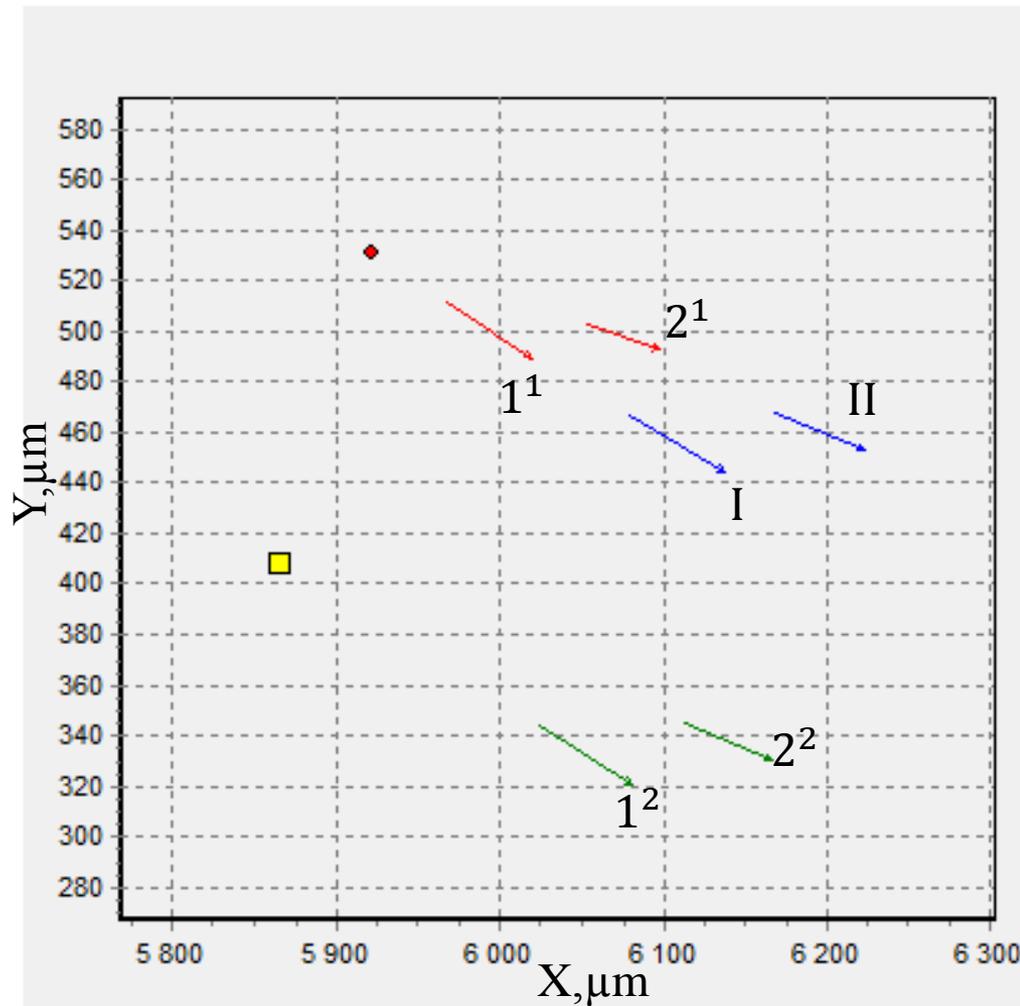


(а) Сравнение результатов спутникового эксперимента UHCRE с учетом фрагментации и без него; (б) сравнение результатов экспериментов UHCRE и ОЛИМПИЯ с диапазонами поправок на фрагментацию.

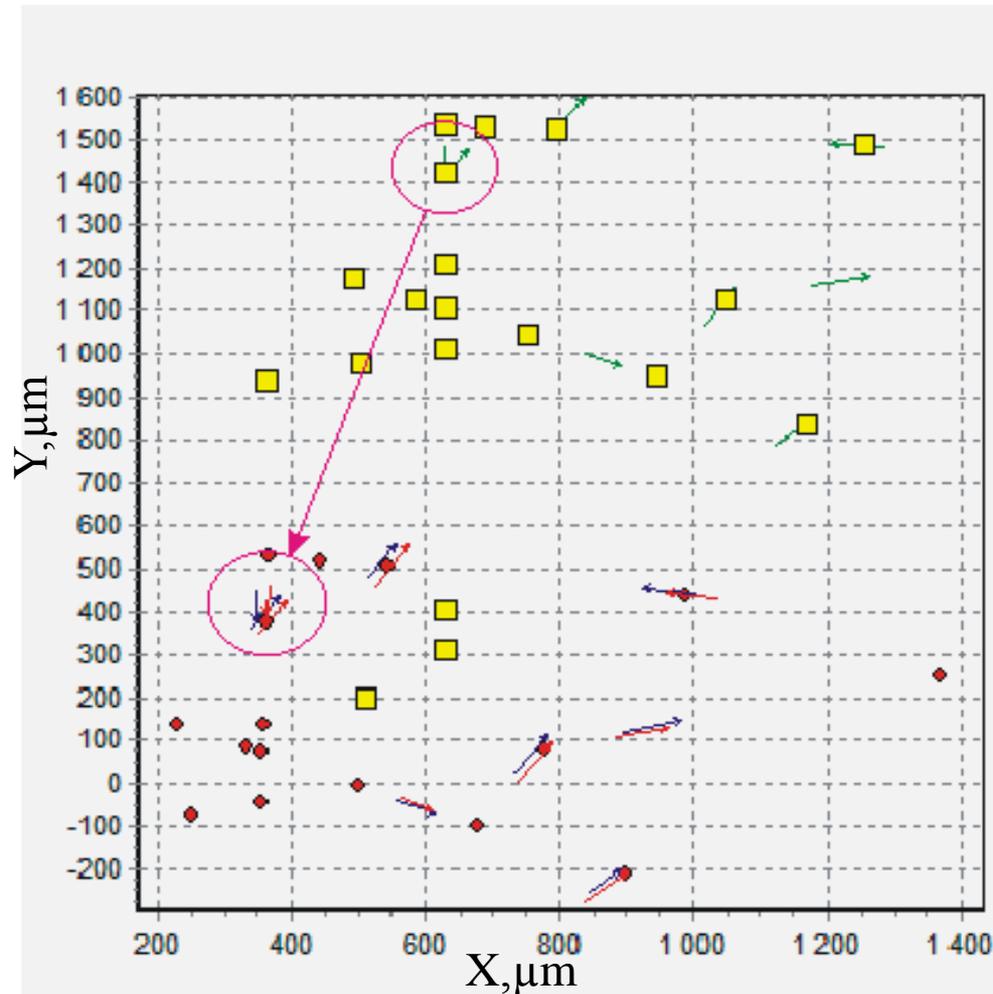
Эксперименты на спутниках имели ту же нижнюю границу по энергии, что и наш эксперимент ( $\sim 1$  ГэВ/нукл), что подразумевает аналогичные условия фрагментации, и, следовательно, аналогичный масштаб поправок, по крайней мере, по порядку величины.

Сделанные расчёты позволяют также объяснить наличие в наших данных ядер с зарядами  $84 \leq Z \leq 89$ . Ядра с зарядами в этом диапазоне не могут содержаться в первичных космических лучах в силу их очень малого времени жизни. Мы полагаем, что регистрация их в нашем эксперименте является результатом фрагментации более тяжелых ядер в доатмосферном слое метеороида .

# результат работы программы в виде изображения исходных треков, точек пересечения и положение треков после сдвига

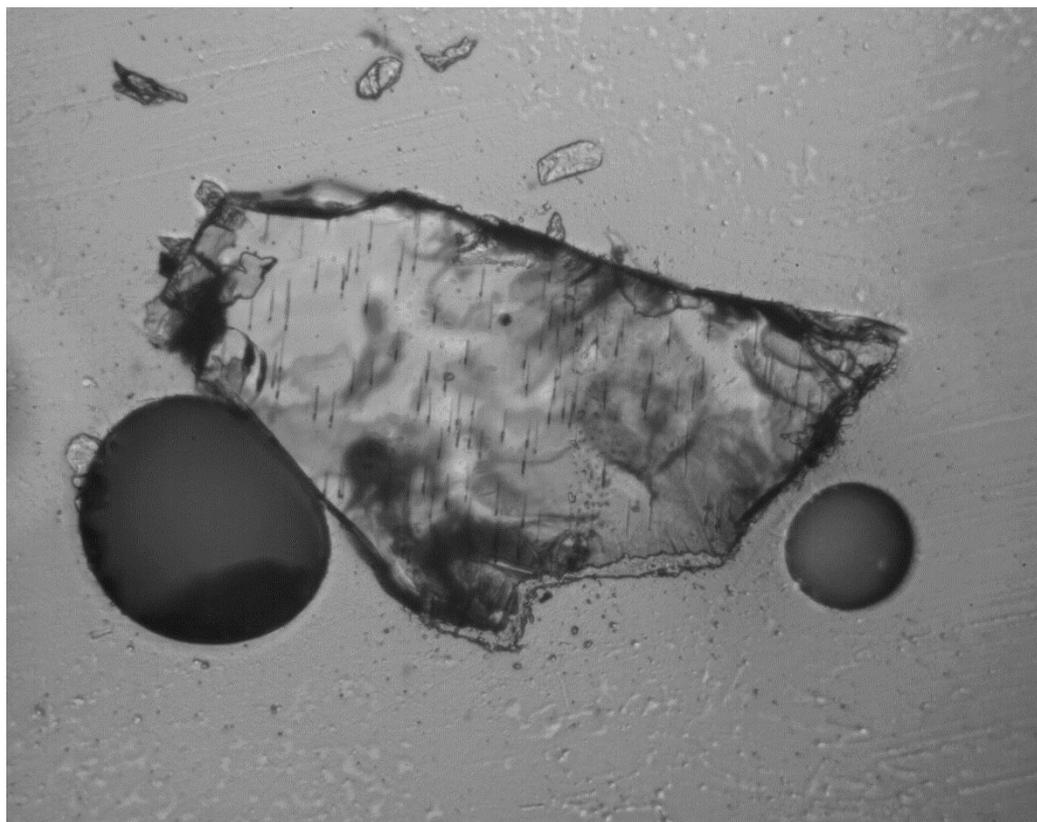


- Этот алгоритм помог избежать ошибки, когда номинальная величина среза была 55 микрон, а расчётная 16 микрон. Внимательный анализ показал, что в этом случае ошибочно была пропущена стадия среза, а была произведена только шлифовка.

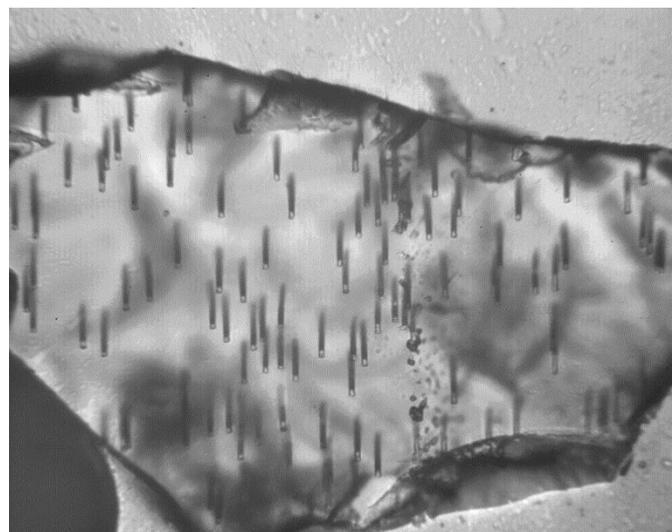


Травление кристаллов проводилось в два этапа по 12 часов.

Ядра  $Vi$  с энергией 2,5 МэВ/нуклон (для примера - кристалл №6)



Первая стадия травления(12 ч.)



Вторая стадия травления (+12 ч.)

**В.К.Егоров**

**Рентгеновский дифрактометр в Институте проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, Черноголовка**

Условия проведения измерений: использовались  $K\alpha, \beta$  - линии Mo, испускаемые молибденовым анодом;

энергия рентгеновских лучей  $E = 25$  кэВ; ток  $I = 15$  мА.

Кристаллы, площадки плоско-полированных поверхностей которых составляли  $(0,2-0,5) \cdot 10^{-2}$  см<sup>2</sup>, устанавливались на дифрактометрическую приставку гониометра. Пучок рентгеновских лучей, проходящий через диафрагмирующие щели шириной 0,1 мм, направлялся под углом  $\theta$  к анализируемой поверхности кристалла, вращающегося вокруг оси, перпендикулярной плоскости облучаемой поверхности.

Путем измерения и регистрации интенсивности отраженных под различными углами рентгеновских лучей устанавливается наблюдаемый набор пиков, характерных для той или иной текстуры исследуемых кристаллов.

Образец	Сечение, мм <sup>2</sup>	Излучение	Ориентация	Угол отклонения $\psi =  \omega - \theta $	Наблюдаемые рефлексы	Относительная интенсивность, %	$\left(\frac{\Delta\theta}{\theta}\right)$	Оценка состава оливина	Степень монокристаллизации
1		<i>Mok<sub>ср</sub></i>	(020)	~0,7°	(020) (040) (080) (0.10.0)	100 2 0,8 1,5	3·10 <sup>-2</sup>	1.68:0.32 (Mg <sub>0,88</sub> Fe <sub>0,12</sub> ) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Низкая
2		<i>Mok<sub>ср</sub></i>	(134)	~0,13°	(134)	100	8·10 <sup>-1</sup>	1.76:0.24 (Mg <sub>0,88</sub> Fe <sub>0,12</sub> ) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Средняя
3		<i>Mok<sub>ср</sub></i>	(020)	~0,2°	(020) (040) (080) (0.10.0) (0.12.0)	100 5 6 17 11	4·10 <sup>-1</sup>	1.68:0.32 (Mg <sub>0,88</sub> Fe <sub>0,12</sub> ) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Высокая
4		<i>Cyk<sub>ср</sub></i>	(131)	<0,1°	(131) (262)	100 2,5	1·10 <sup>-1</sup>	1.82:0.18 (Mg <sub>0,88</sub> Fe <sub>0,12</sub> ) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Высокая
5		<i>Cyk<sub>ср</sub></i>	(101)	~3,6°	(101)	100	1·10 <sup>-1</sup>	1.76:0.24 (Mg <sub>0,88</sub> Fe <sub>0,12</sub> ) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Высокая

II. Минералы, минеральные виды, номенклатура минералов, минералогические системы и минеральные агрегаты

## О НЕКОТОРЫХ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЯХ КРИСТАЛЛОВ ОЛИВИНА ИЗ МЕТЕОРИТА МАРЬЯЛАХТИ

В. К. Егоров<sup>1</sup>, Л. Л. Кашкаров<sup>2</sup>, Н. Г. Полухина<sup>3</sup>, В. А. Царев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, Черноголовка, [egorov@ipmt-hpm.ac.ru](mailto:egorov@ipmt-hpm.ac.ru)

<sup>2</sup> Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН, [ugeochem@geochem.home.chg.ru](mailto:ugeochem@geochem.home.chg.ru)

<sup>3</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия, [poluhina@sci.lebedev.ru](mailto:poluhina@sci.lebedev.ru)

**Введение.** Оливин, представляющий собой силикатную фракцию метеоритов — палласитов [1], является высоко эффективным природным детектором ядер тяжелых элементов космических лучей [2]. Определение заряда этих ядер осуществляется на основа-

Задача диагностики степени совершенства структуры оливина осложнена специфическим фактором, свойственным его структуре. Ее главным структурным мотивом является наличие гексагональной плотнейшей упаковки (ГПУ) атомов кислорода. При кристал-

Средняя

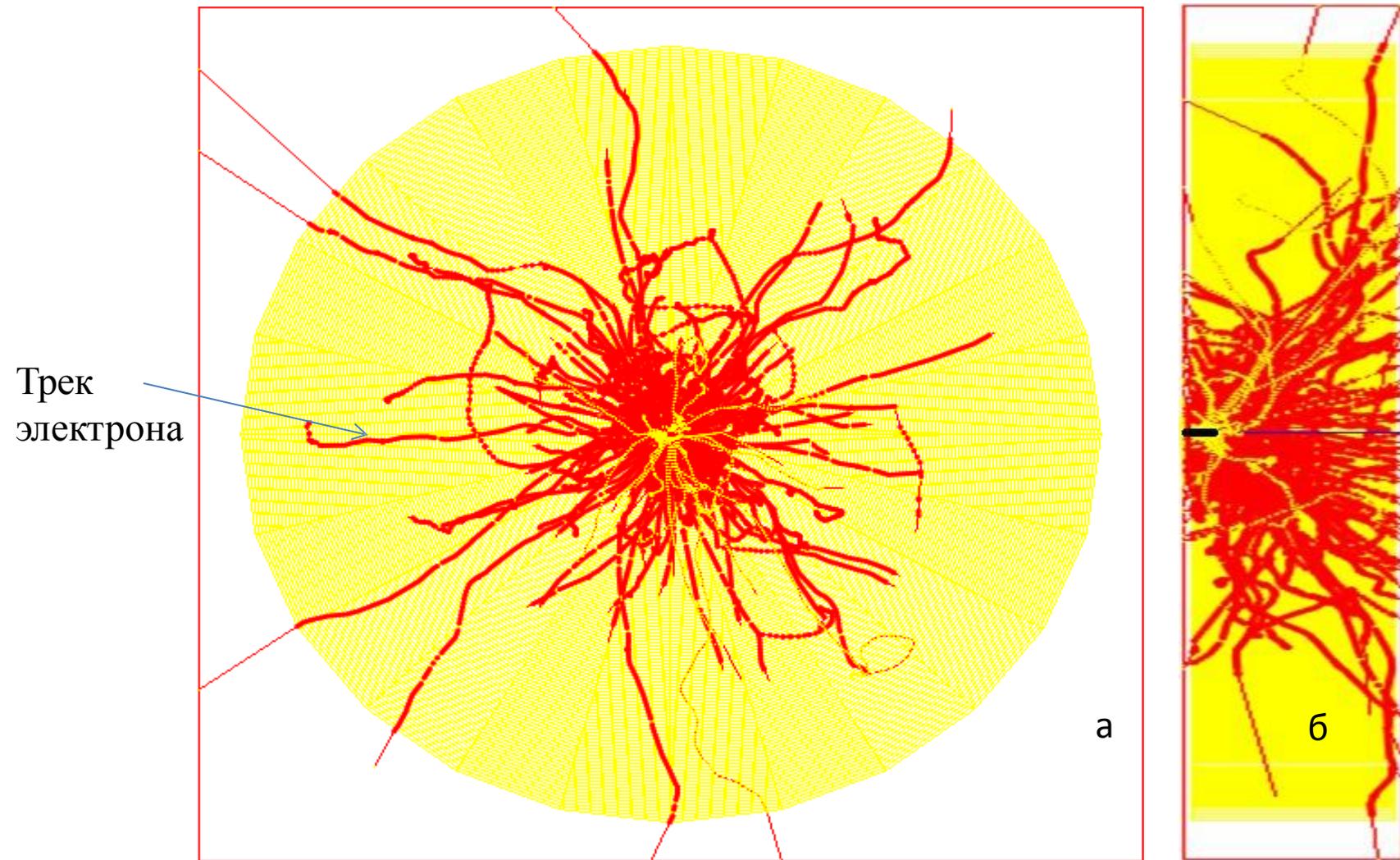
можно текстура сокого качества

Высокая

Средняя

морфность или елкодисперсия

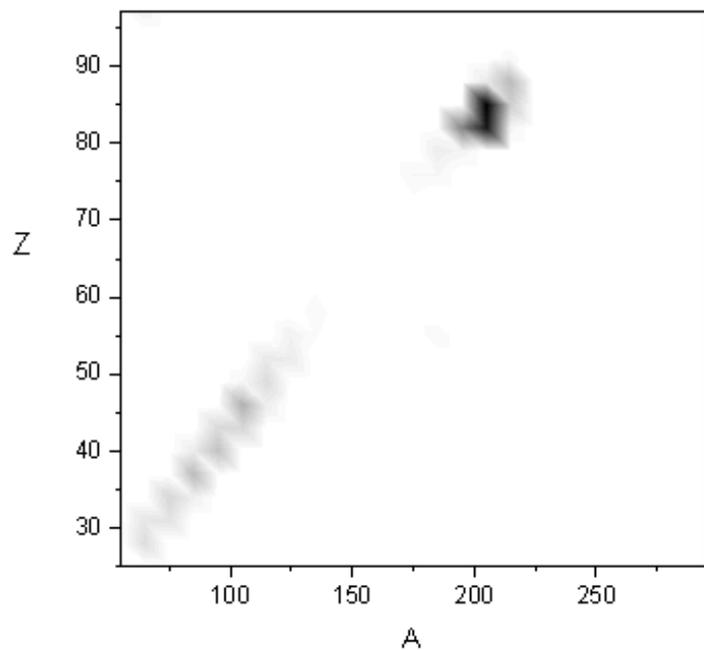
# Событие прохождения ядра урана (100 МэВ/нуклон) через детектор (Geant4)



Вид спереди (а) и вид сбоку (б)

# Распределение по заряду и массе фрагментов свинца и урана при энергии 100 МэВ/нуклон

Свинец



Уран

