

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

**ХІІІ ЧЕРЕНКОВСКИЕ ЧТЕНИЯ "НОВЫЕ МЕТОДЫ В
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ И ФИЗИКЕ ЧАСТИЦ**

**Исследование особенностей
протравленных треков сверхтяжёлых
ядер в оливинах из метеоритов.**

Тан Найнг Со, Полухина Н.Г, Старков Н.И

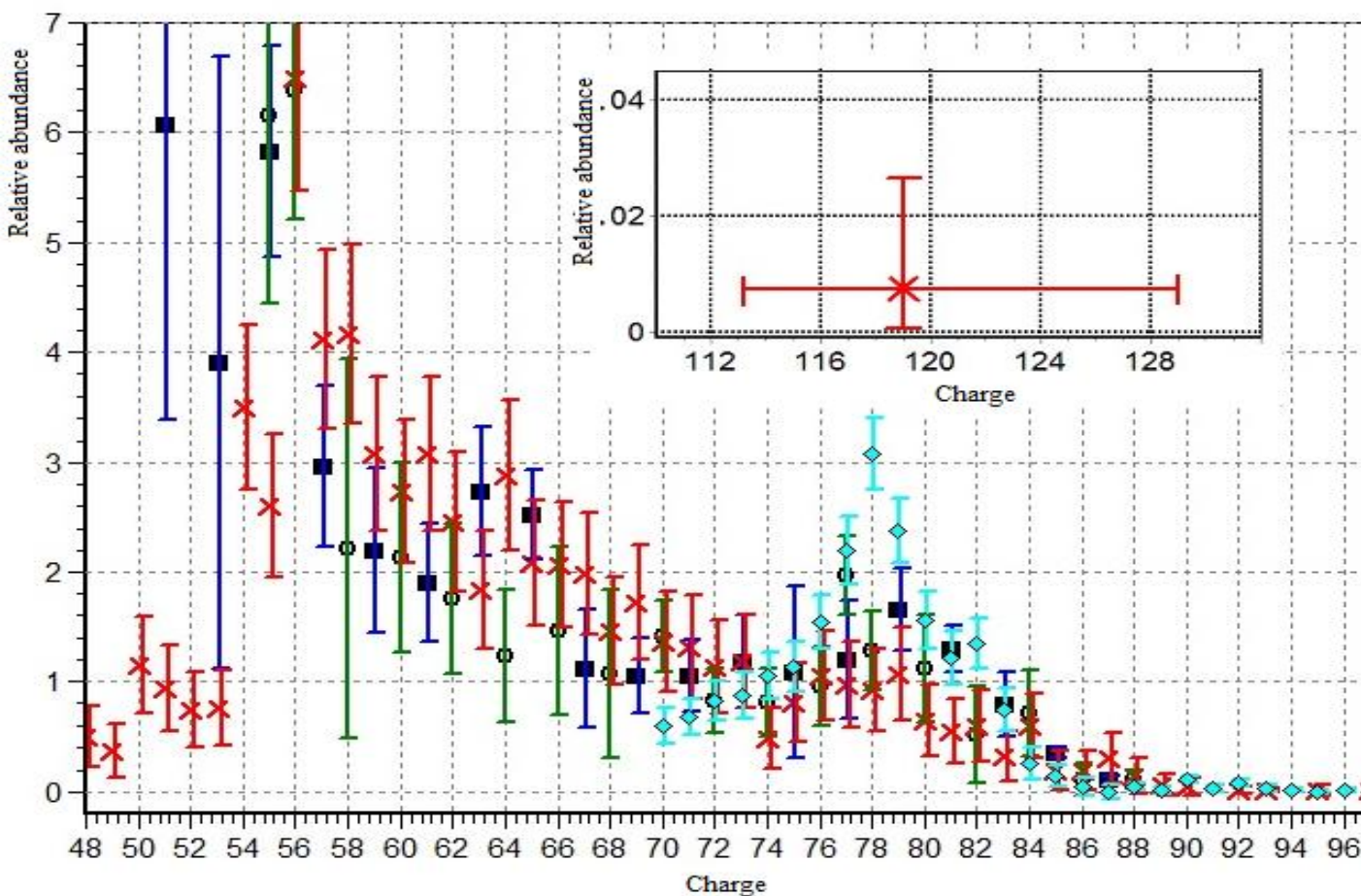
Москва, ФИАН, 14 апреля 2020 г.

План доклада

- Введение
- Исследование особенностей протравленных треков сверхтяжёлых ядер
- Расчеты в GEANT4
- Результаты расчётов по GEANT4
- Модель молекулярной динамики
- Выводы

Введение

В Физическом институте им. Лебедева РАН в рамках проекта ОЛИМПИА методом химического травления проводятся исследования сверхтяжёлых ядер из метеоритов. К настоящему времени найдено более 20000 с зарядом Z более 50.



кружки – Ariel-6,
квадраты – НЕАО-3,
ромб – UNCRE,
кресты – ОЛИМПИА

Спектр космических ядер

Исследование особенностей протравленных треков сверхтяжёлых ядер

Среди найденных треков около 2% имеют необычную форму протравленных каналов.

На рисунке А показан типичный протравленный канал ядра с зарядом $Z=70$, а на рисунке Б показан протравленный канал ядра $Z=65$, имеющий необычную форму “шприца”.



А



Б

Треки, имеющие форму “шприца”, различаются по геометрии, размерам и другим характеристикам



Существует проблема понимания природы происхождения треков такой необычной формы.

1. Важны детали прохождения тяжёлых ионов через оливин и образование повреждений электронных связей в кристаллах выбитыми частицами.

=> Расчёты в GEANT4

2. Эта проблема также связана с механизмами формирования области структурных изменений и последующего травления, происходящими в этом случае.

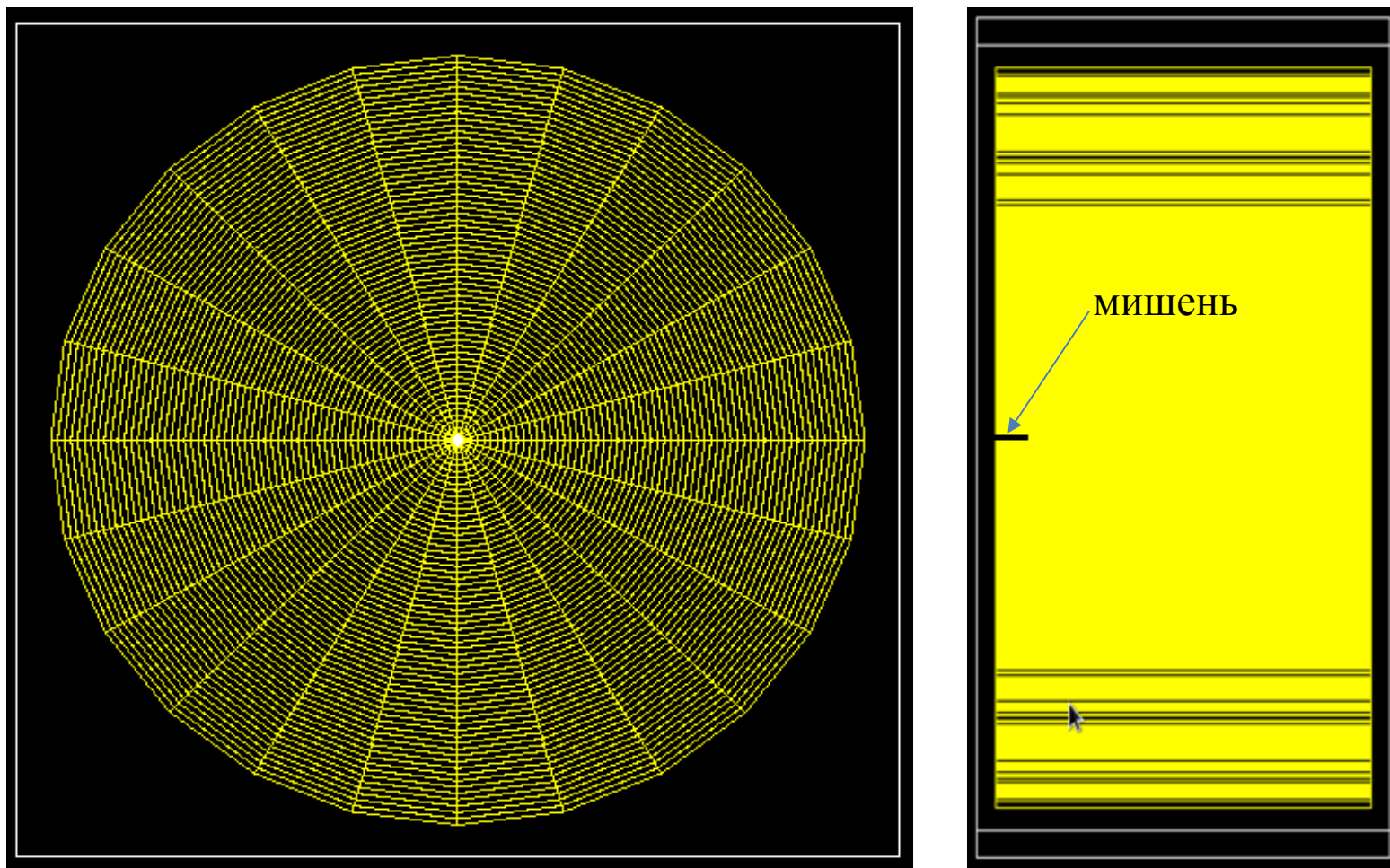
=> Молекулярно-динамическая модель структурных изменений в ядре трека. Модель химической активации, основанная на теории активированного комплекса. Реакционно-диффузионная модель жидкостного травления

(Волков А.Е, Горбунов С.А. и др.)

Расчеты в Geant4

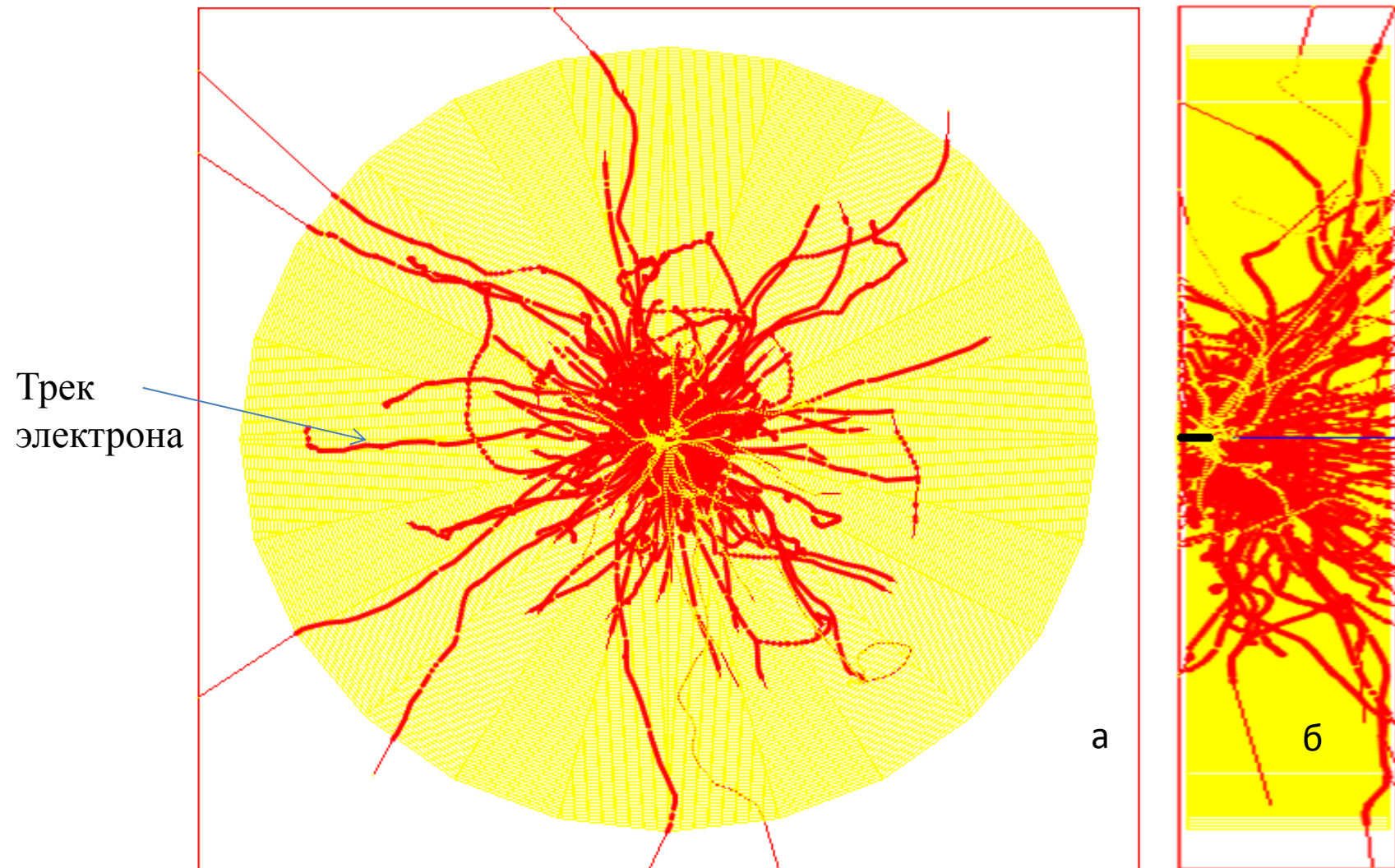
В рамках комплекса GEANT4 проведены многочисленные расчёты прохождения ионов через оливин

Конструкция Детектора (концентрические кольца)



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 $L=2\text{ мкм}$. Число цилиндрических слоёв $N=120$.

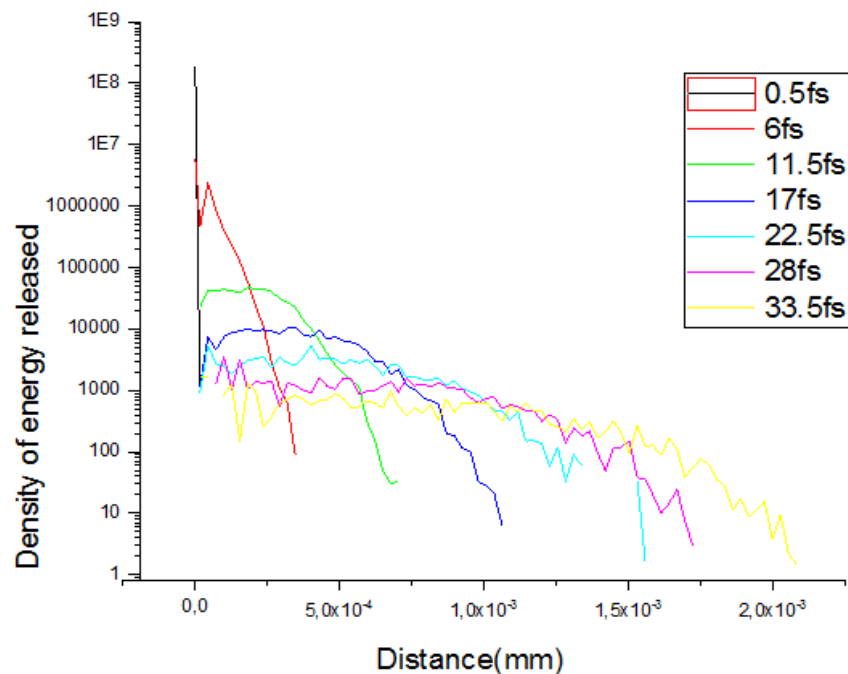
Событие прохождения ядра урана (100МэВ/нуклон) через детектор (Geant4)



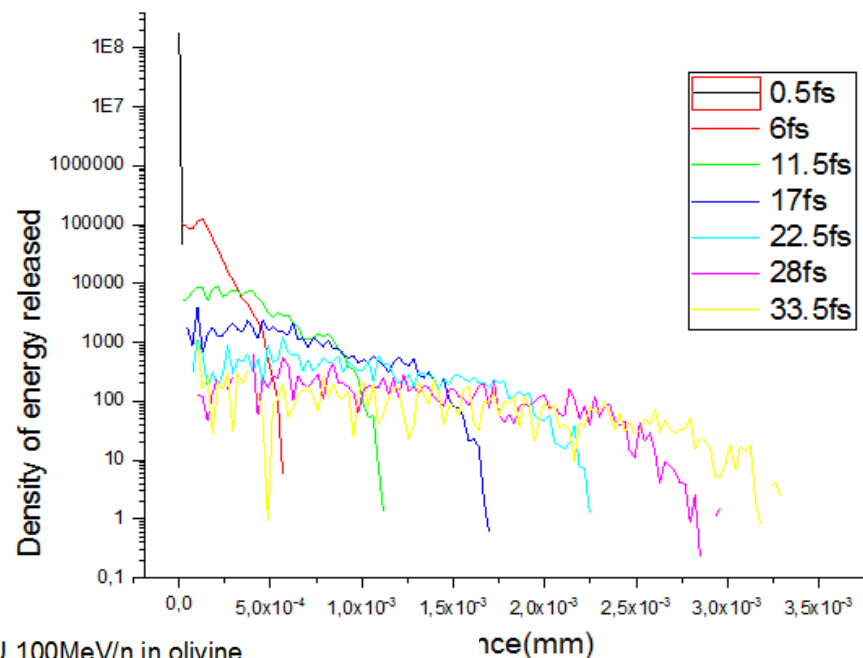
Вид спереди (а) и вид сбоку (б)

Распределения плотности выделений энергии в зависимости от расстояния до иона и времени ($t < 33\text{fs}$) при разных энергиях.

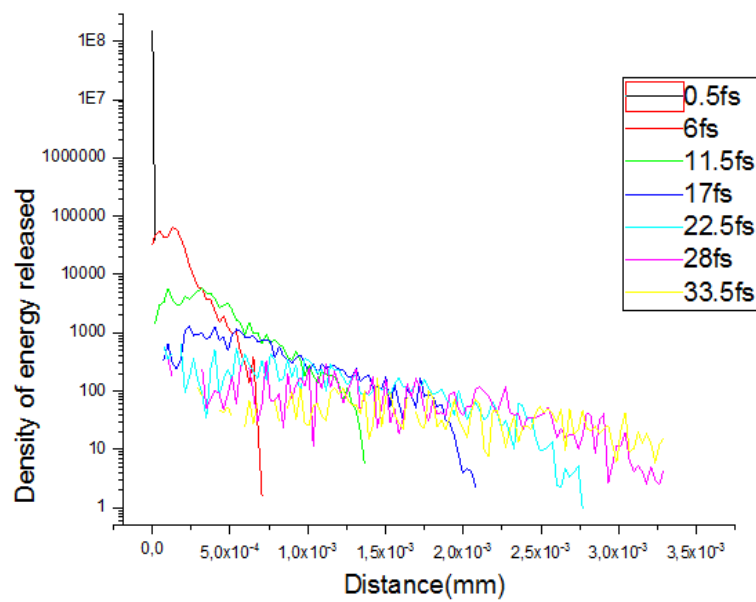
U 10MeV/n in olivine



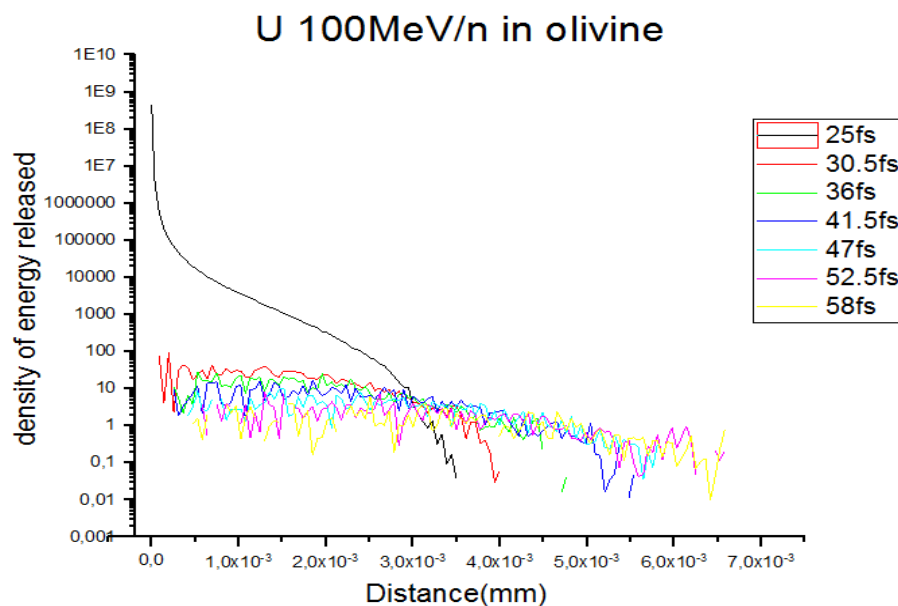
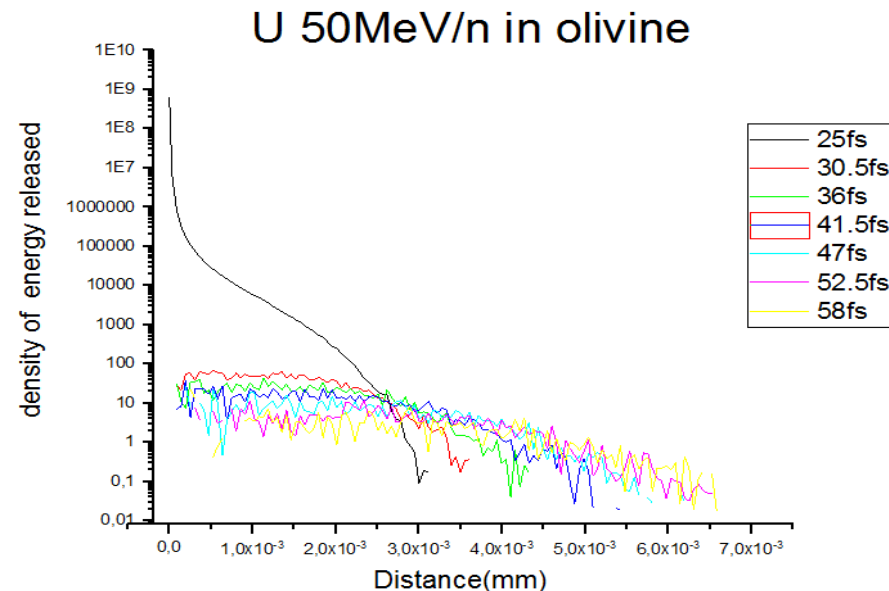
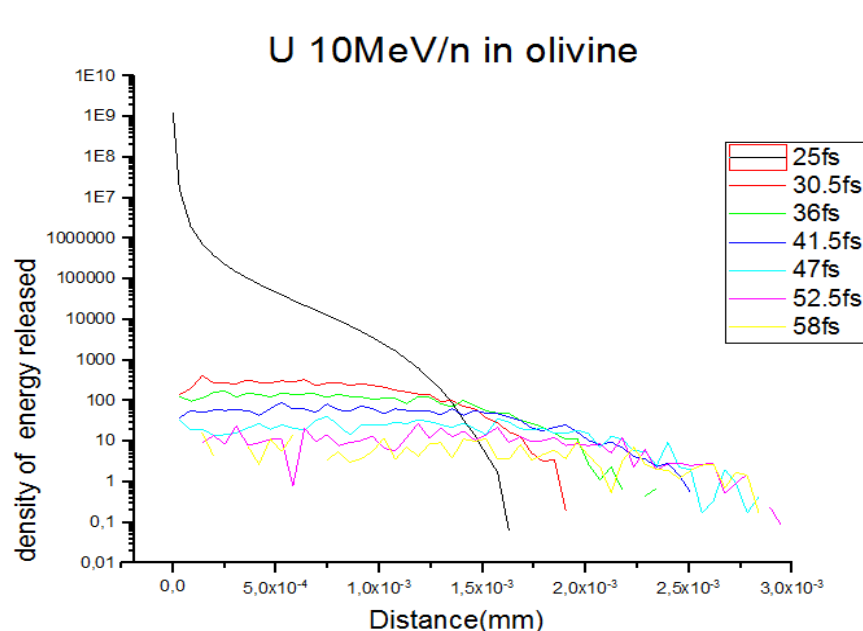
U 50MeV/n in olivine



U 100MeV/n in olivine

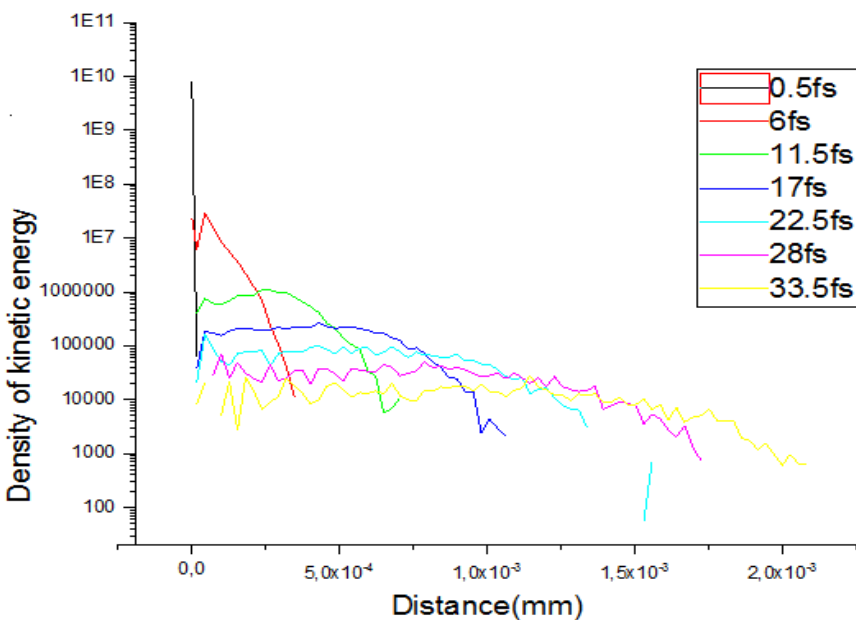


Распределения плотности выделений энергии в зависимости от расстояния до иона и времени ($t > 25\text{fs}$) при разных энергиях.

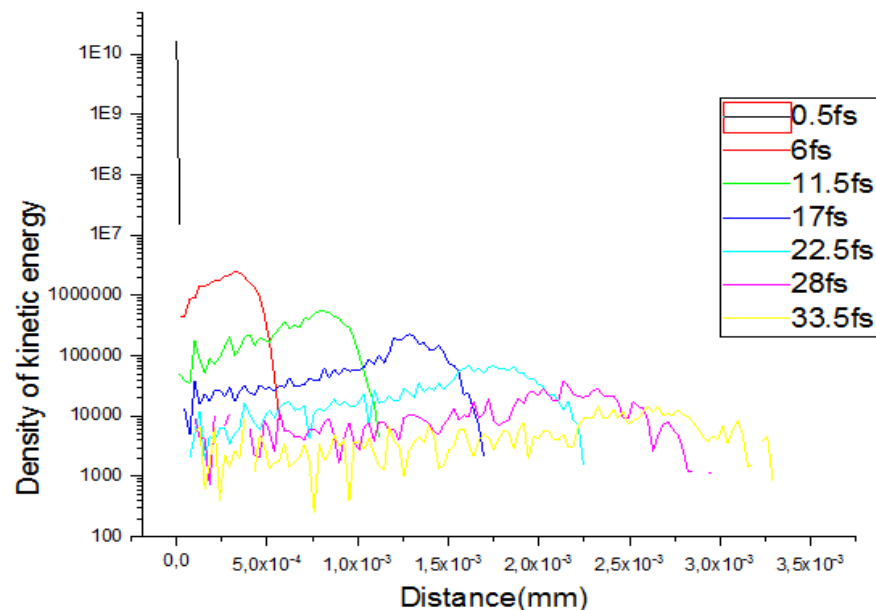


Распределения плотности кинетической энергии в зависимости от расстояния до иона и времени ($t < 33\text{fs}$) при разных энергиях.

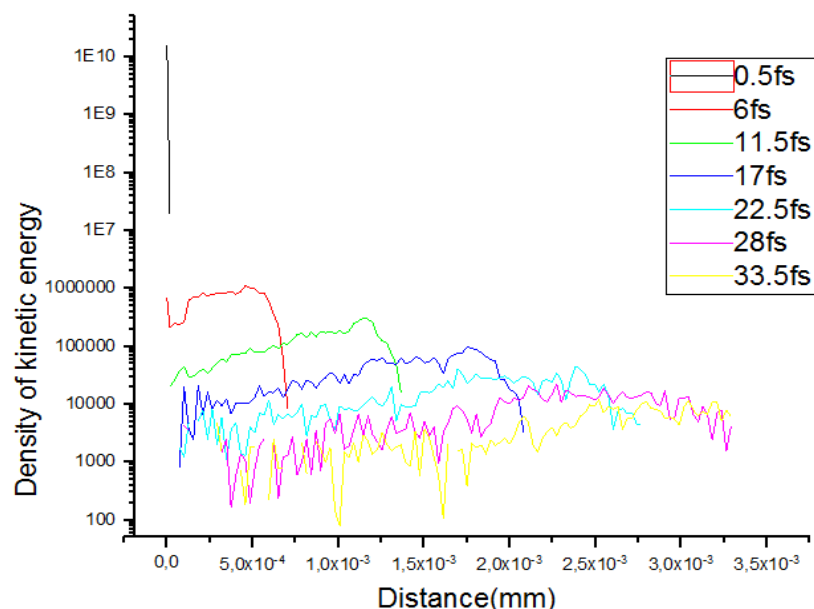
U 10MeV/n in olivine



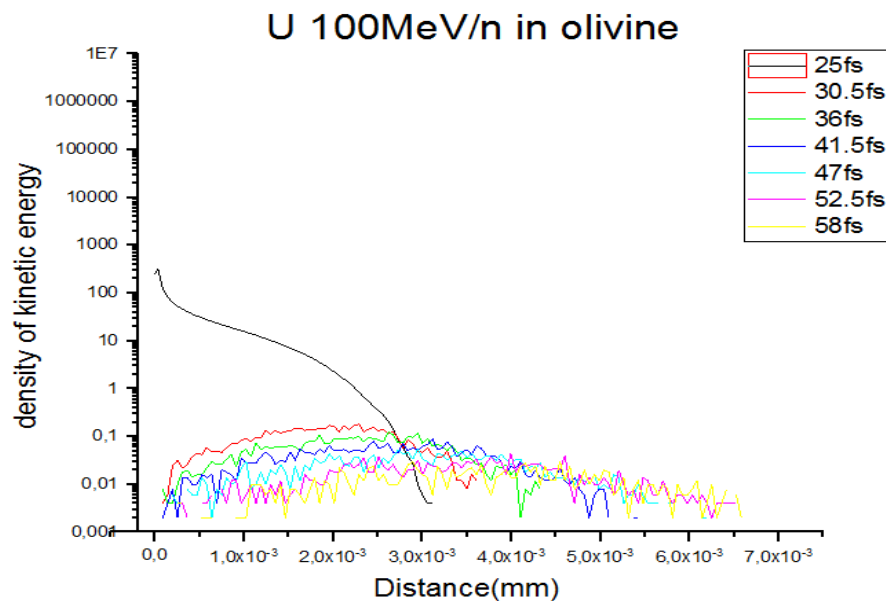
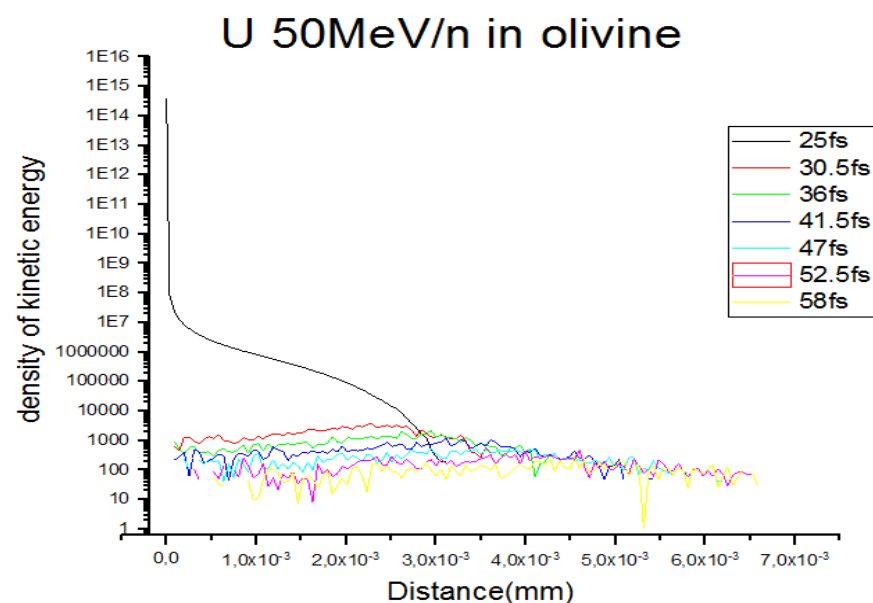
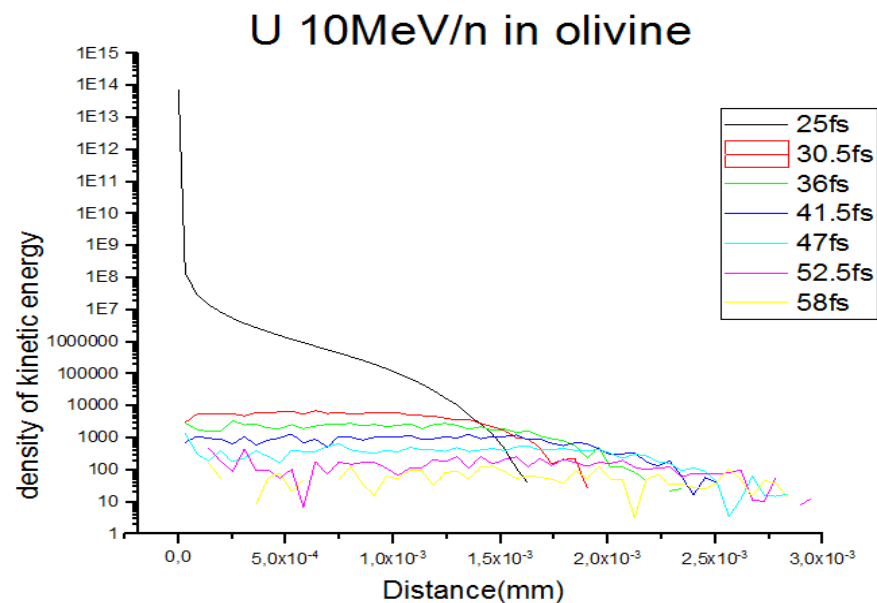
U 50MeV/n in olivine



U 100MeV/n in olivine



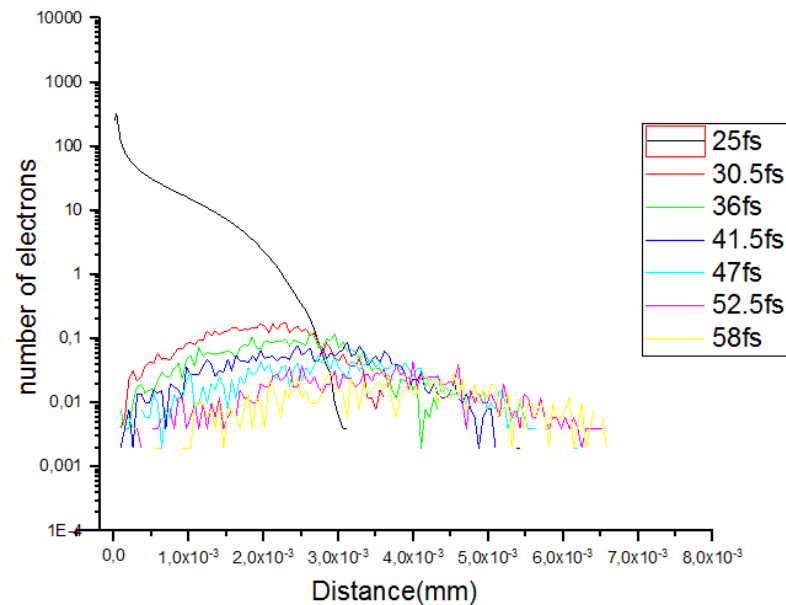
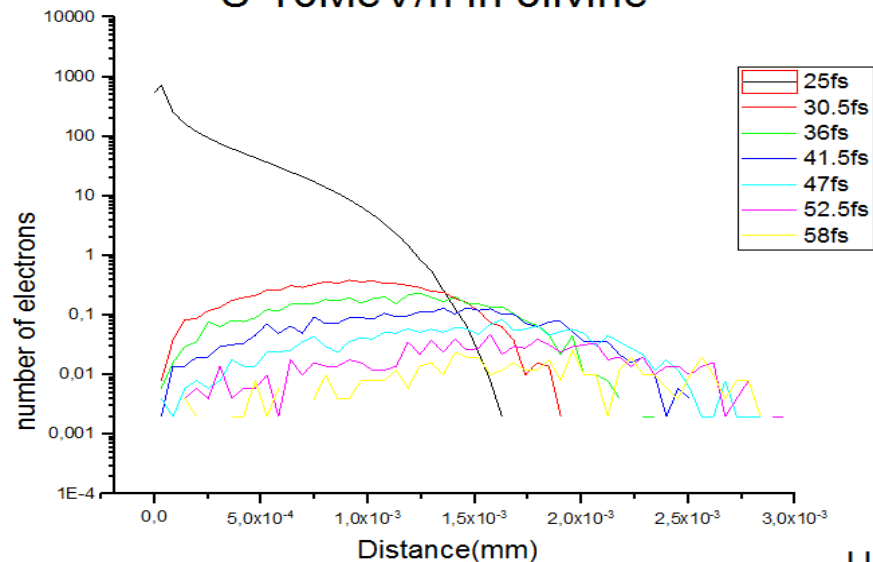
Распределения плотности кинетической энергии в зависимости от расстояния до иона и времени ($t > 25\text{fs}$) при разных энергиях.



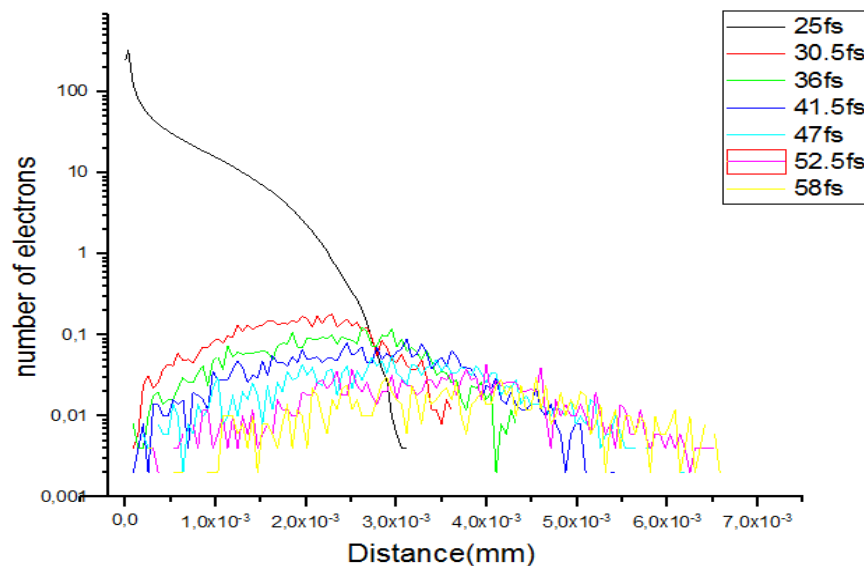
Распределения числа электронов в зависимости от расстояния до иона и времени ($t > 25\text{fs}$) при разных энергиях.

U 50MeV/n in olivine

U 10MeV/n in olivine

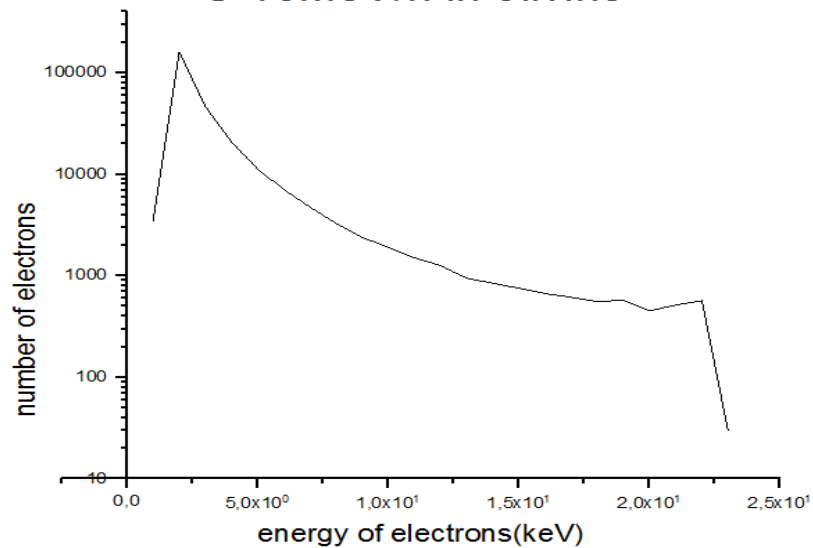


U 100MeV/n in olivine

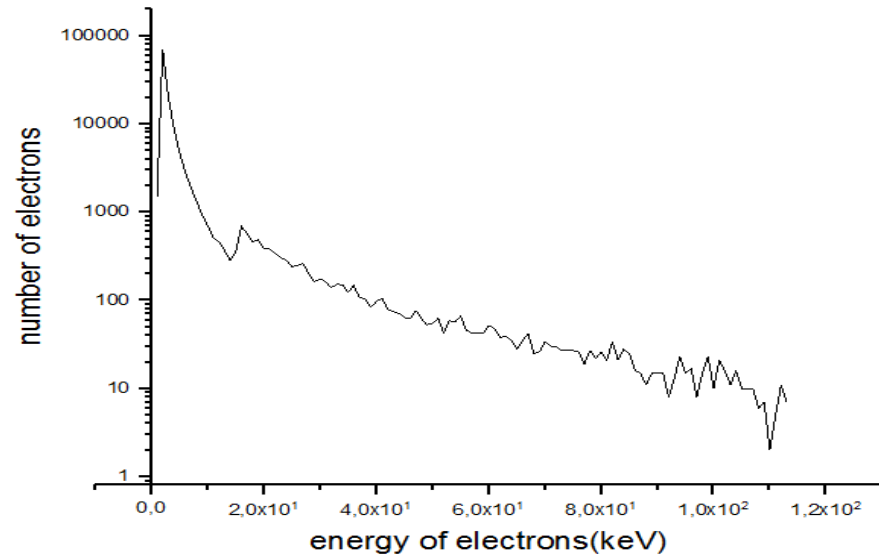


Спектры электронов в зависимости от энергии

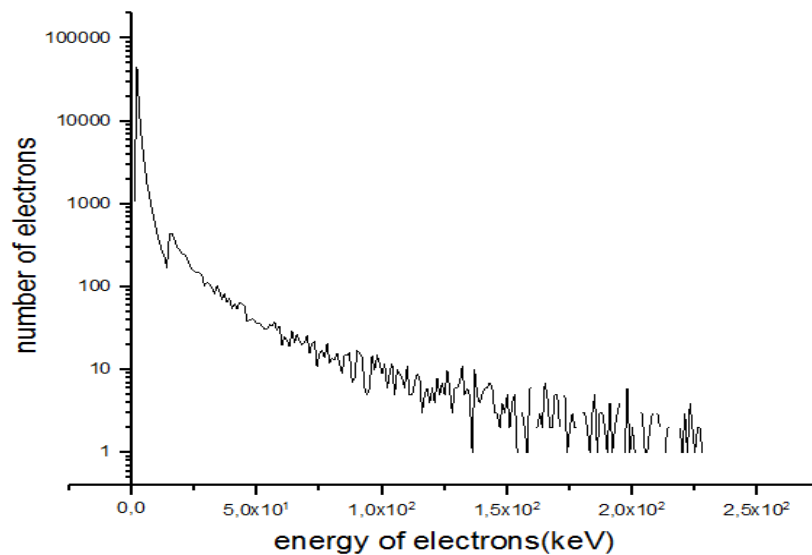
U 10MeV/n in olivine



U 50MeV/n in olivine

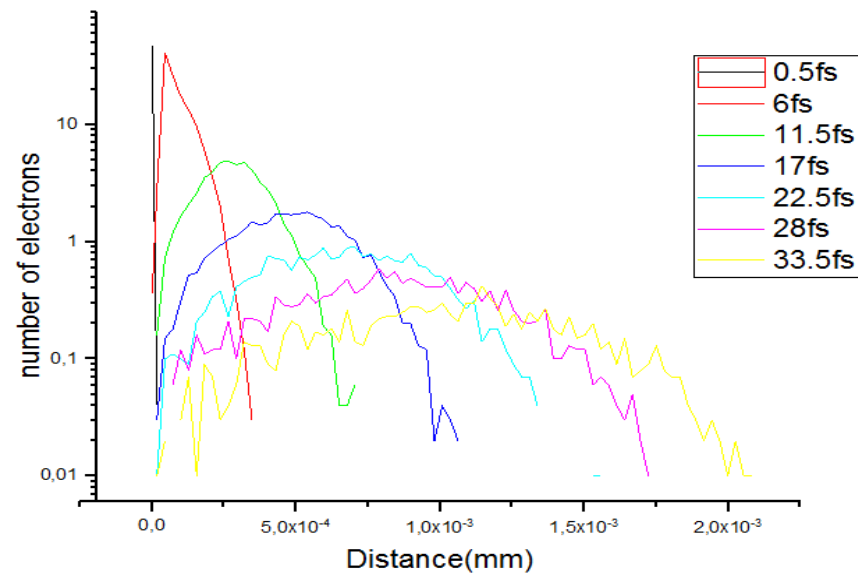


U 100MeV/n in olivine

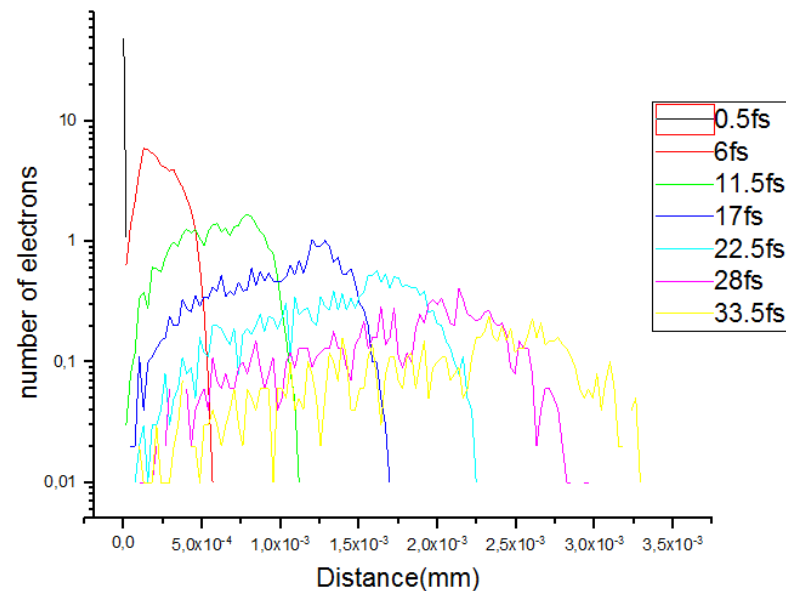


Распределения числа электронов в зависимости от расстояния до иона и времени ($t < 33\text{fs}$) при разных энергиях.

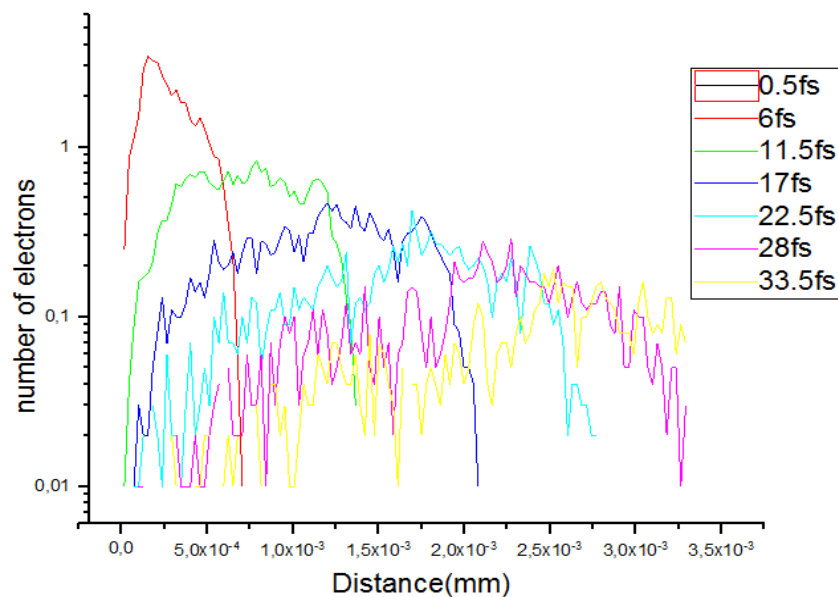
U 10MeV/n in olivine



U 50MeV/n in olivine



U 100MeV/n in olivine



Результаты расчётов по GEANT4

1. Полученные результаты для урана и других ядер показывают, что энергии и числа дельта электронов не достаточно для создания резкого изменения условий травления и образования “шприцов” диаметром в несколько микрон.
2. Необходимо исследовать роль ядер отдачи и их способность создать условия для возникновения “шприцов”.

Модель молекулярной динамики

Волков А.Е., Горбунов С.А. и др.

Для расчётов используется модель (TREKIS), позволяющая производить Монте-Карло розыгрыш событий прохождения ионов через вещество, молекулярно-динамическая модель (LAMMPS), теория активированного комплекса и реакционно-диффузионная модель процесса травления для получения характеристик травимого канала.

(J. Phys. D: Appl. Phys. **50** (2017) 395306 (8pp)

<https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa8153>)

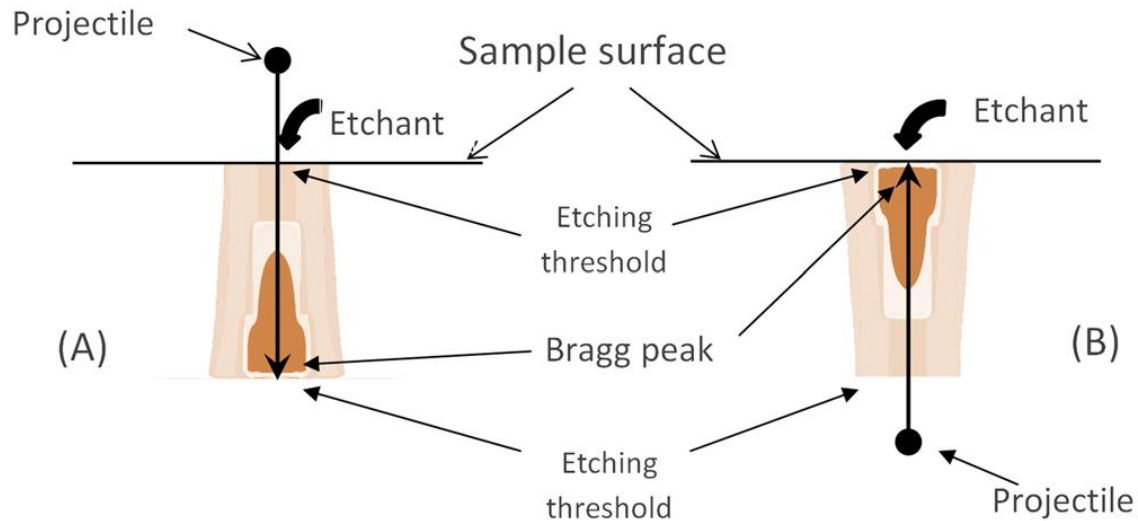
Модель основана на уравнениях химической кинетики и использует теорию переходного состояния для определения равновесной скорости реакции $K(T)$. Зависимость K от температуры T описывается уравнением

$$K(T) = \frac{k_B T}{2\pi\hbar} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta G^{++}}{RT}\right)$$

ΔG^{++} - энергия активации Гиббса
 R - газовая постоянная

Модель показывают наличие некоторого расширения области повреждений материала в конце пути ядра, что может приводить к более широкому размеру канала травления.

Однако ширина области повреждений (десятки нанометров) на несколько порядков меньше, чем геометрические характеристики “шприца” (микроны) и не может объяснить их происхождение.



- **Scientific Reports | (2019) 9:15325 | <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51748-y>**

Выводы

- В настоящее время не существует объяснения природы происхождения протравленных каналов в форме “шприца”.
- Требуются дополнительные исследования.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!!