



МГУ имени М.В. Ломоносова

---

НИИЯФ имени Д.В. Скобельцына

# Восстановление энергетического спектра пучка электронов по глубинному дозовому распределению с использованием распределения Ландау

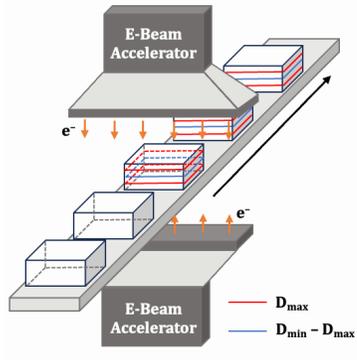
---

С.А. Золотов, У.А. Близнюк, Н.А. Антипина, П.Ю. Борщegovская, А.Д. Никитченко,

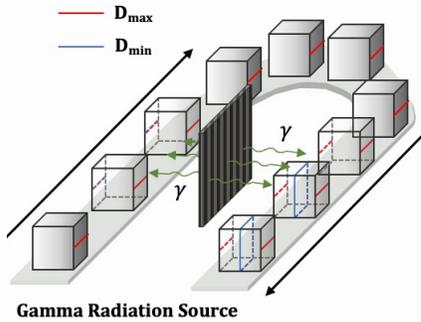
А.А. Николаева, Ф.Р. Студеникин, А.П. Черняев

# Центры промышленной радиационной обработки в РФ

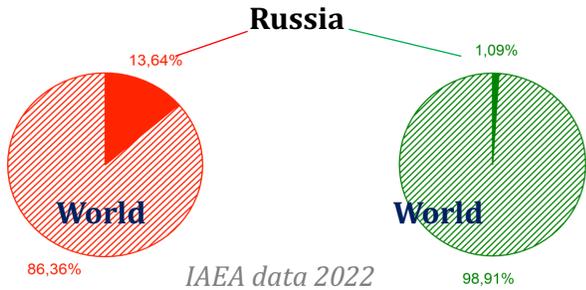
## E-Beam Irradiator



## Gamma Irradiator



## Центры рад. обработки в РФ



### E-Beam Irradiators

### Gamma Irradiators

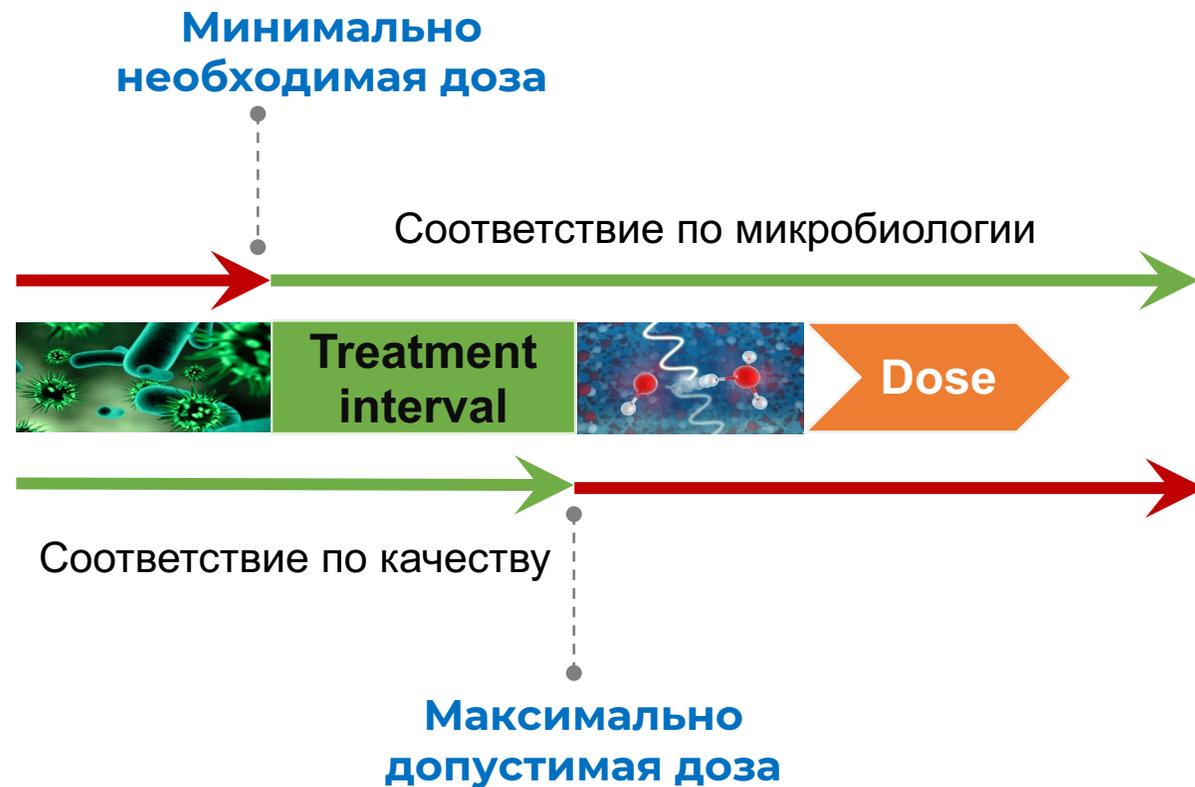
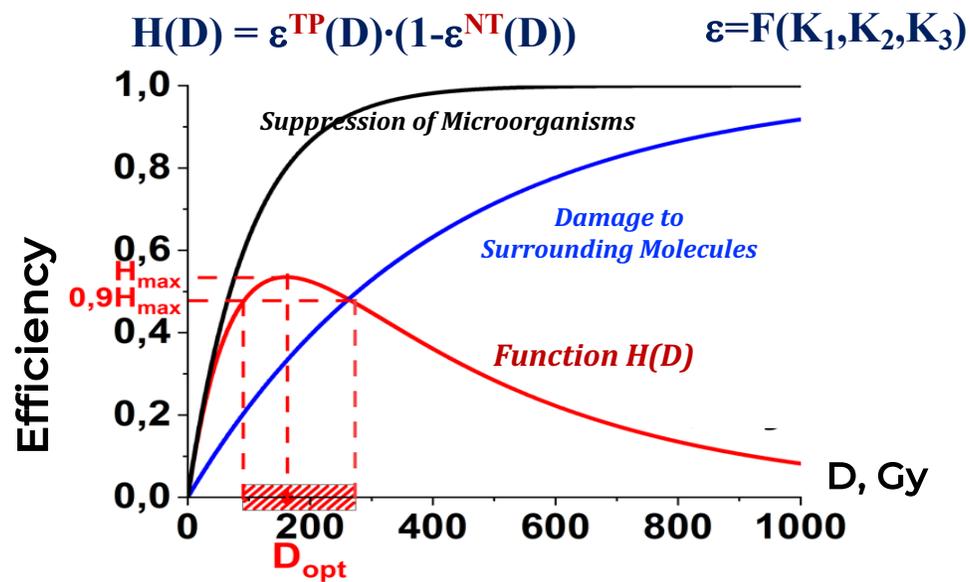
## Key Irradiation Facilities

Organization	Irradiator	Type Irradiators	Energy
NIIEFA ROSATOM	E-Beam	S-band linac	5 MeV
RAD	E-Beam	S-band linac	5-10 MeV
Axenter	E-Beam	S-band linac L-band linac	10 MeV 10 MeV
CORAD	E-Beam	S-band linac	5-10 MeV
Ural Federal University ROSATOM	E-Beam	S-band linac S-band linac S-band linac	0.5 MeV 1 MeV 8-10 MeV
SINP MSU	E-Beam	L-band linac C-band linac	1 MeV 5-10 MeV
FMBC FMBA	E-Beam	S-band linac	7.5-10 MeV
IPCE RAS	E-Beam	Rhodotron	6-10 MeV
SFM Pharm Ltd	E-Beam	RF linac	5 MeV
Budker Institute of Nuclear Physics	E-Beam	RF linac DC rectifier	1.5-5 MeV 1.4 MeV
RIRAE	γ-ray	<sup>60</sup> Co	4.47*10 <sup>15</sup> Bq
IPCP RAS	γ-ray	<sup>60</sup> Co	1.4*10 <sup>15</sup> Bq



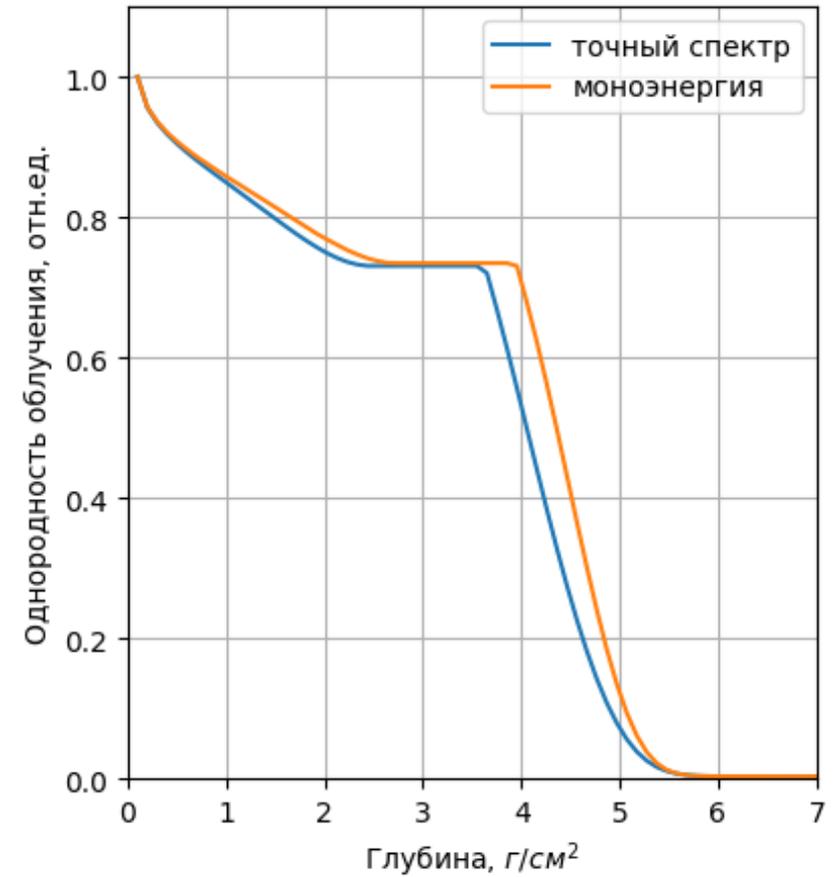
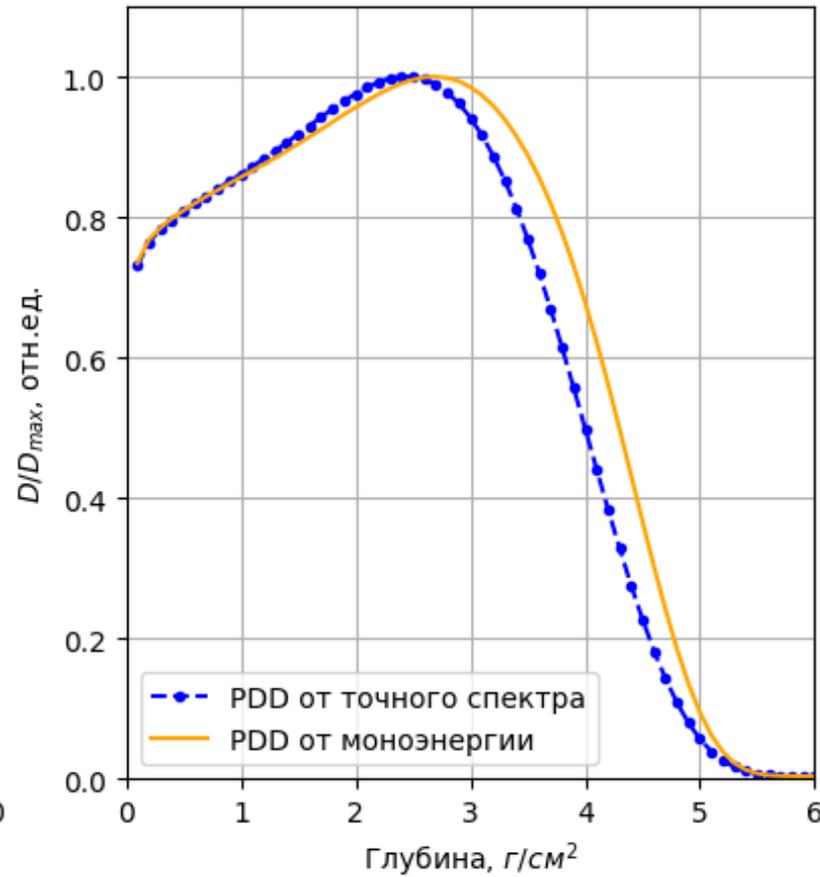
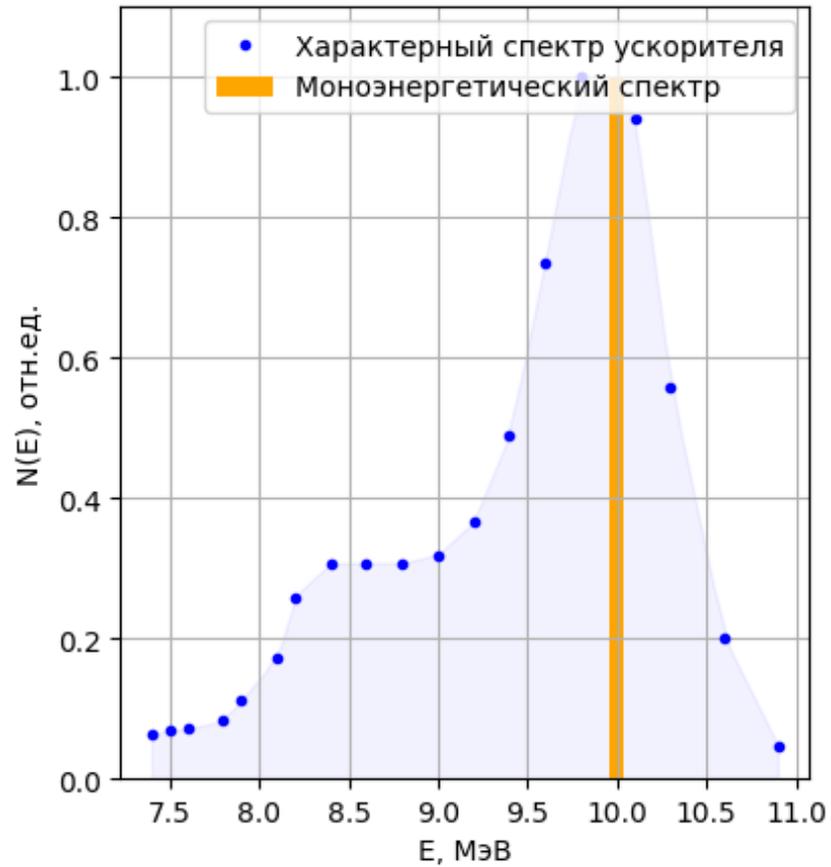
# Проблема однородности в радиационной обработке

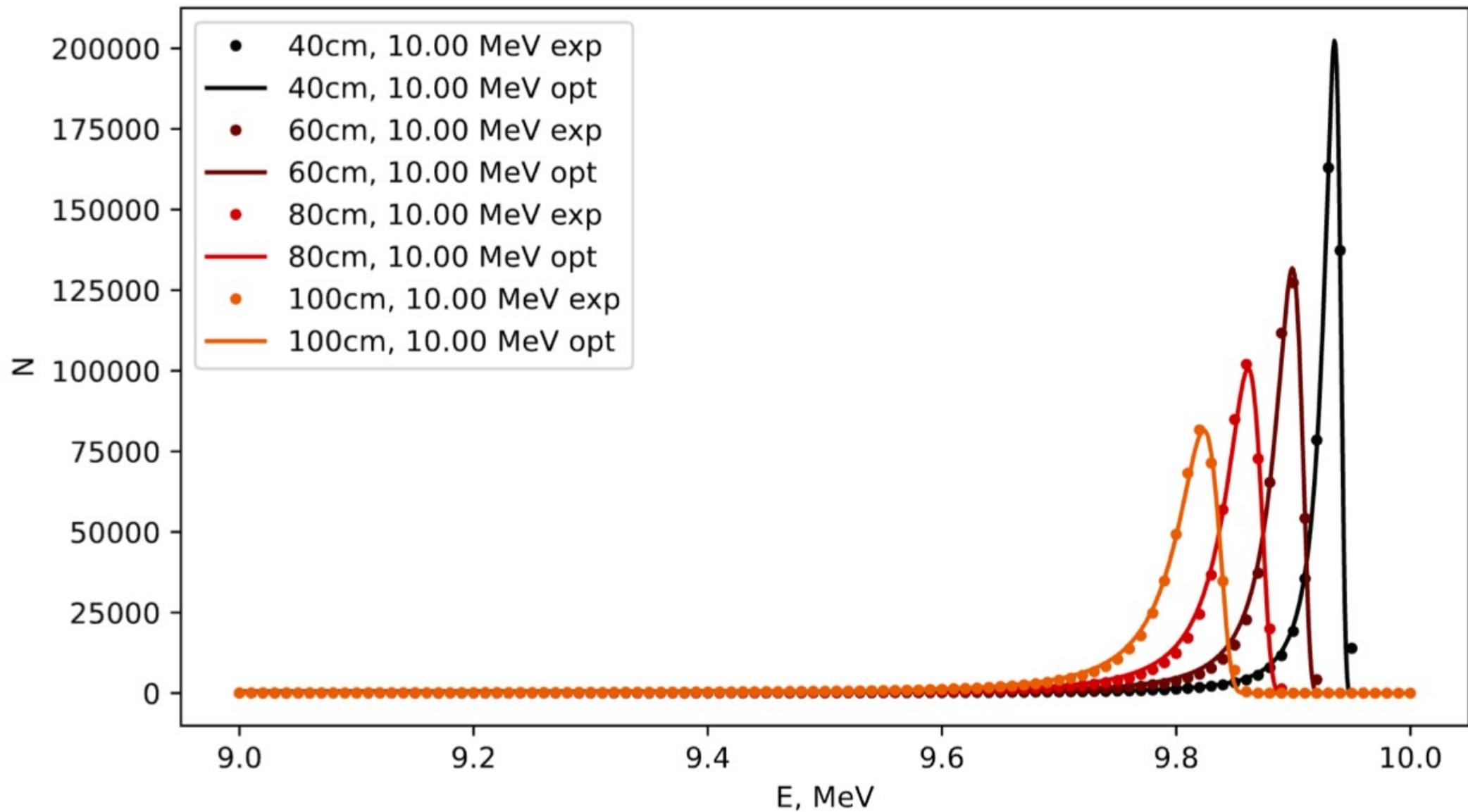
**Solution:** Determining optimal dose range using optimization function  $H(D)$



**Облучение должно  
тщательно планироваться!**

# Оценка однородности методом компьютерного моделирования



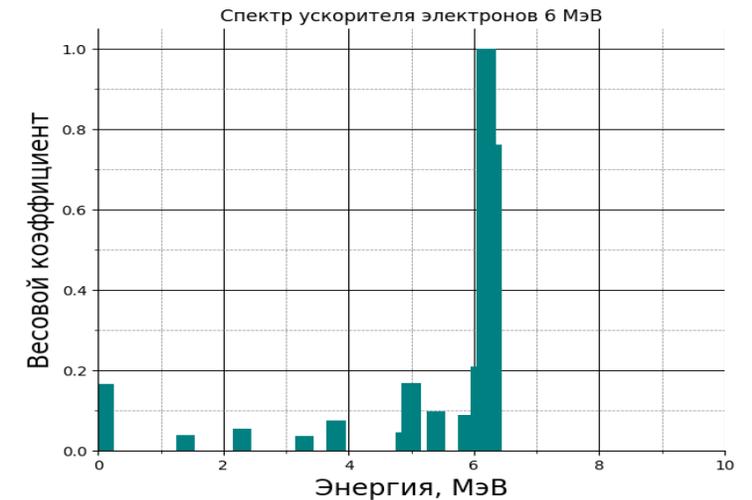
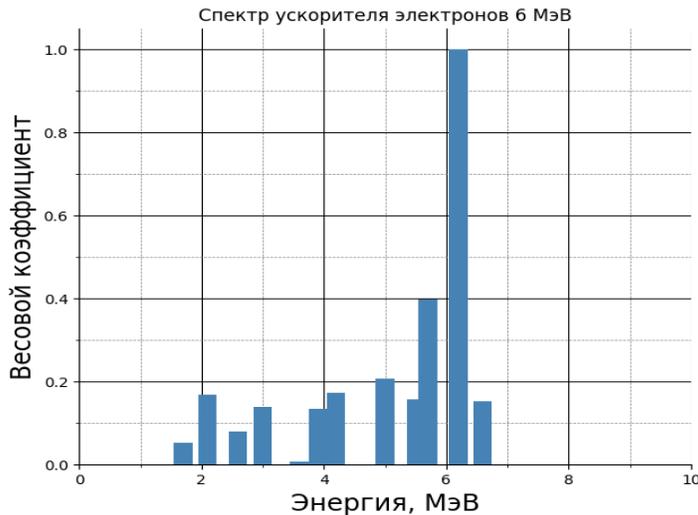
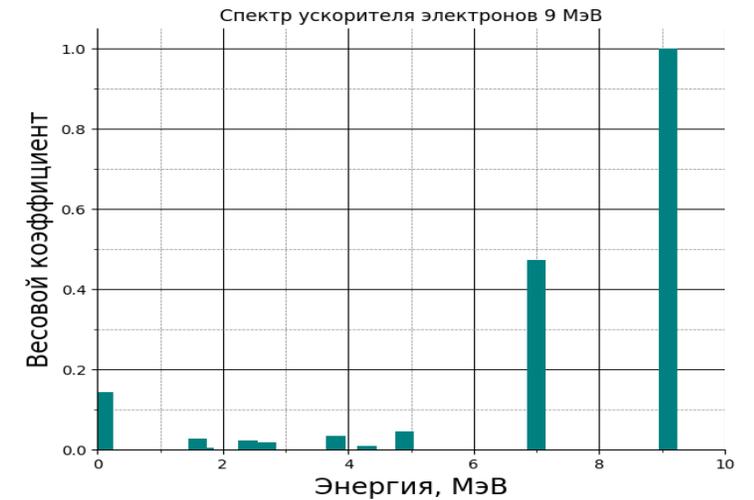


# Математическая постановка задачи восстановления энергетического спектра излучения по глубинному дозовому распределению

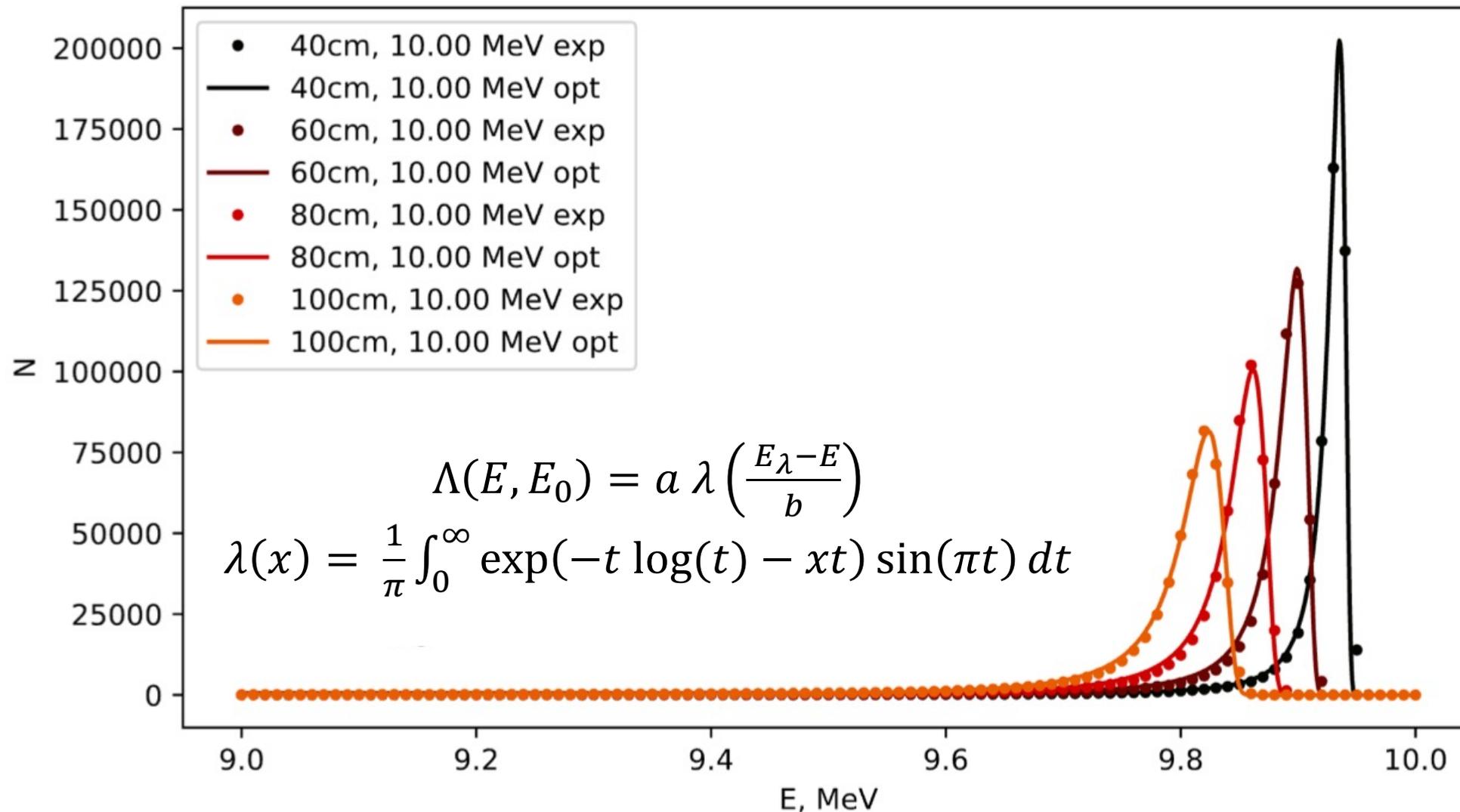
В простейшем одномерном случае глубинное дозовое распределение  $D(x)$  связано с энергетическим спектром излучения  $\Phi(E)$  интегральным уравнением Фредгольма 1 рода:

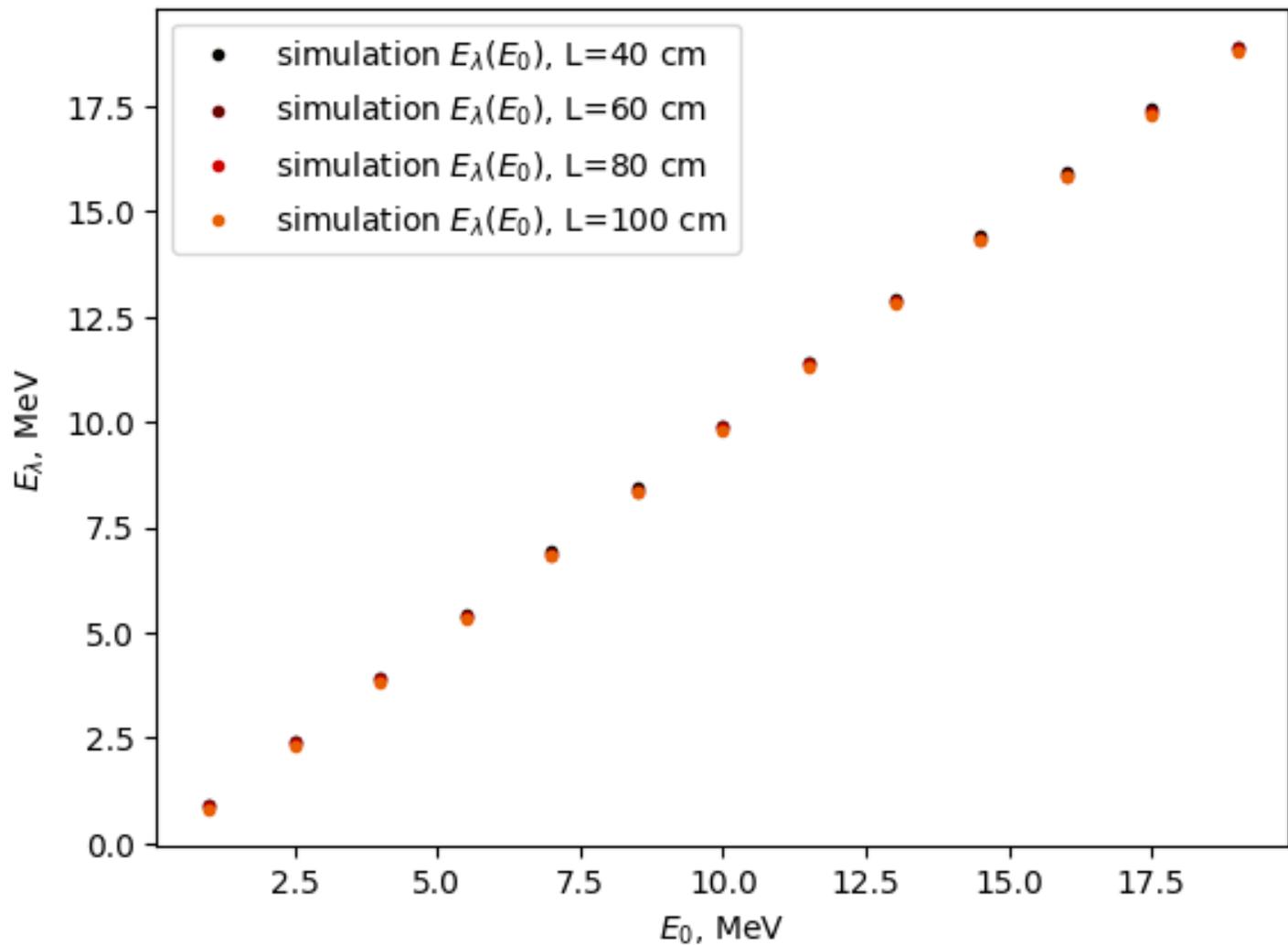
$$D(x) = \int_0^{E_{max}} \Phi(E) d(E, x) dE$$

$d(E, x)$  – глубинное дозовое распределения от моноэнергетических электронов с энергией  $E$ .



# Регуляризация задачи с помощью распределения Ландау



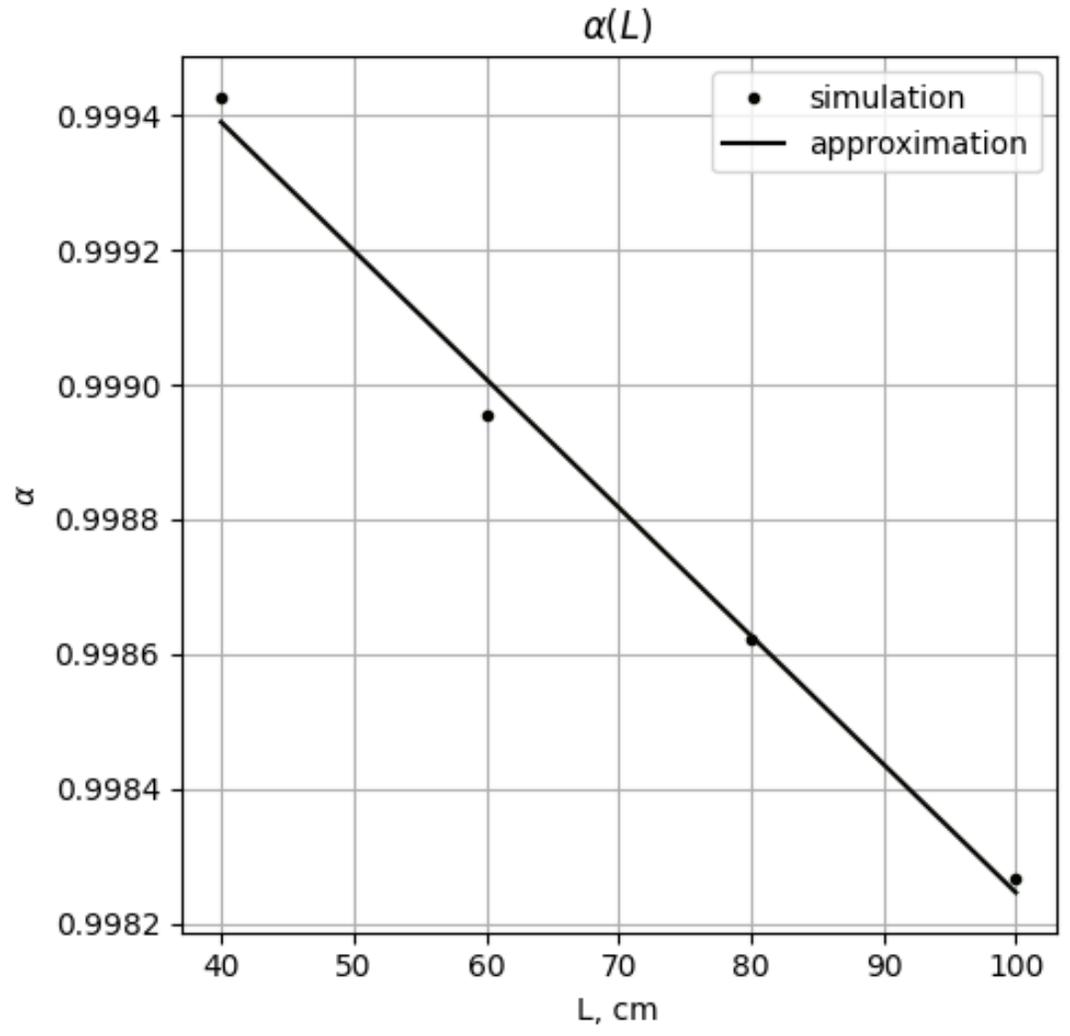


## Аппроксимация

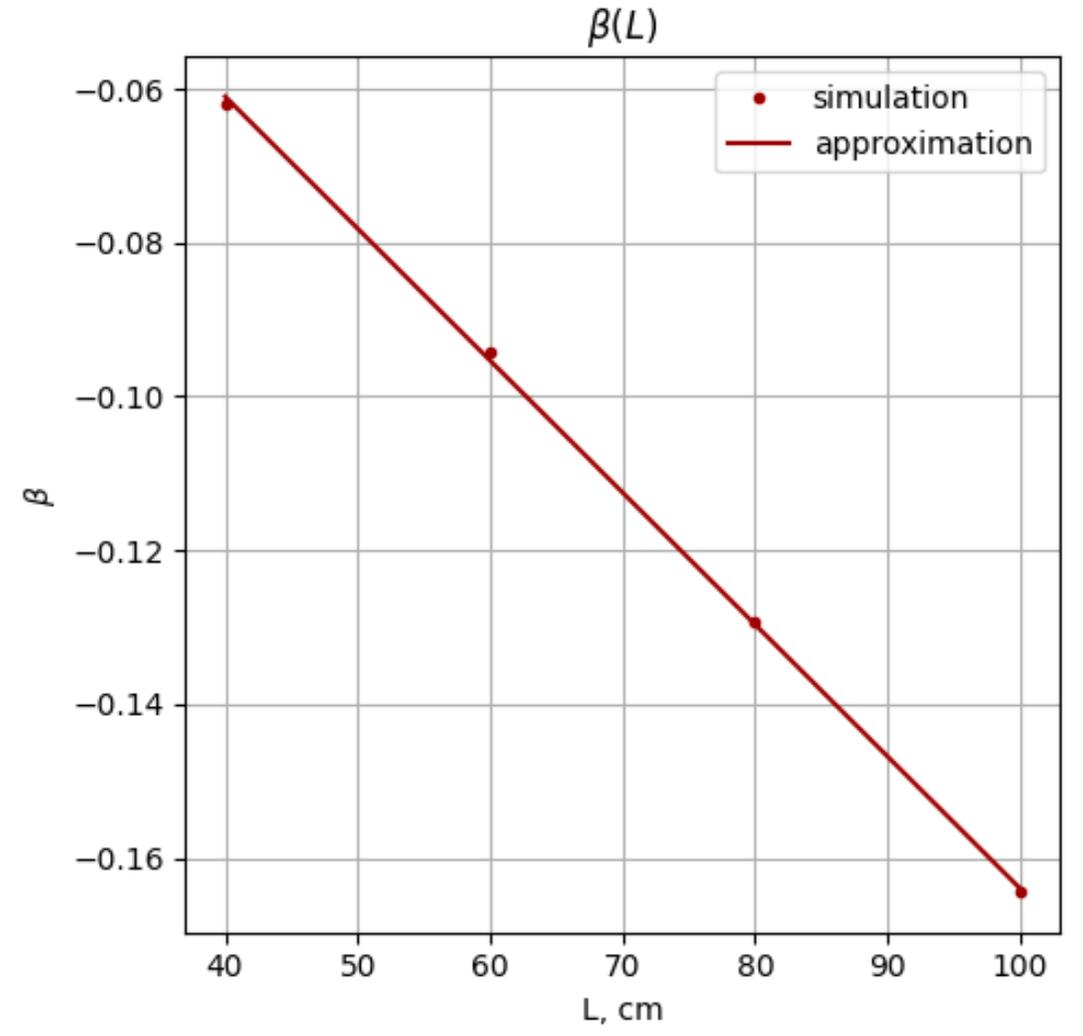
$$E_{\{\lambda\}} = \alpha E_0 + \beta$$

L	$\alpha$	$\beta$
40	0.999428	-0.061819
60	0.998955	-0.094222
80	0.998622	-0.129349
100	0.998268	-0.164503

$$\alpha(L) = a_\alpha L + b_\alpha$$
$$a_\alpha = -1.96 * 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$$
$$b_\alpha = 1 \text{ cm}$$



$$\beta(L) = a_\beta L + b_\beta$$
$$a_\beta = -0.0017 \text{ cm}^{-1}$$
$$b_\beta = 0.0076 \text{ cm}$$



## Регуляризированная задача

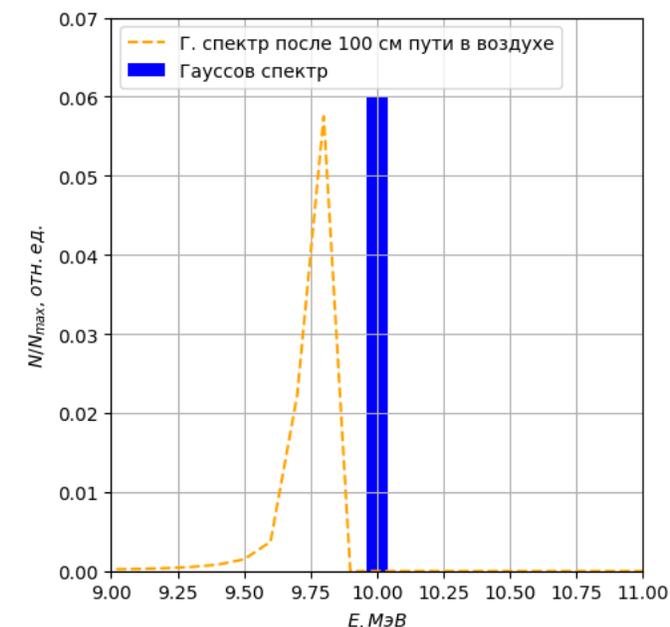
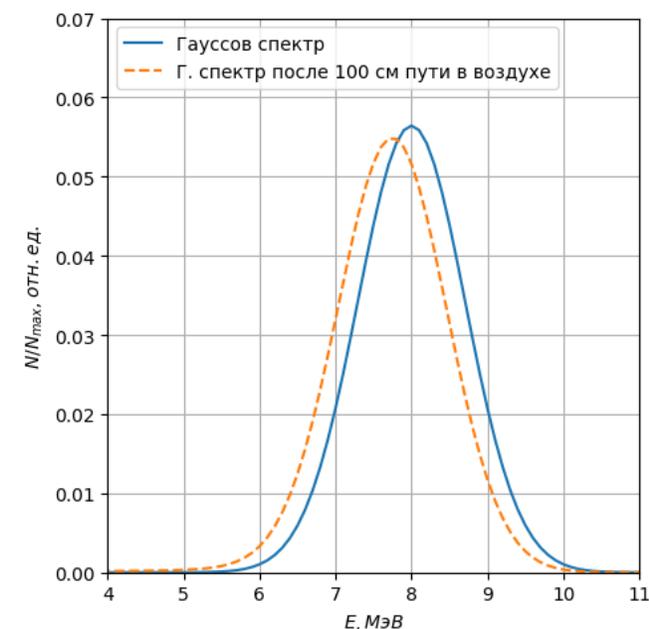
$$D(x) = \int_0^{E_{max}} \Phi(E) d(E, x) dE$$

$$\Phi(E, L) = \int_0^{E_{max}} \Phi_0(\epsilon) a(\epsilon, L) \lambda\left(\frac{\alpha(L)E - \beta(L) - \epsilon}{b(\epsilon, L)}\right) d\epsilon$$

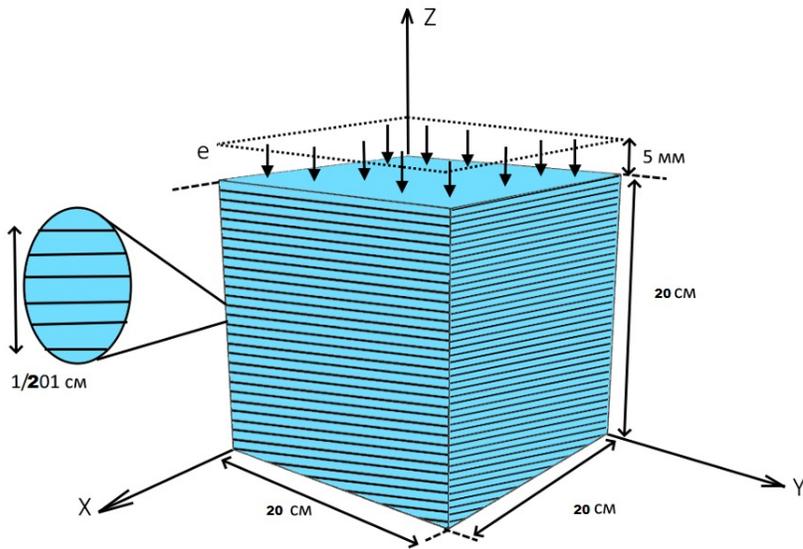
$$\Lambda(E, E_0, L) = a(E_0, L) \lambda\left(\frac{\alpha(L)E_0 + \beta(L) - E}{b(E_0, L)}\right)$$

$$\lambda(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \exp(-t \log(t) - xt) \sin(\pi t) dt$$

$d(E, x)$  – глубинное дозовое распределения от моноэнергетических электронов с энергией  $E$ .



# Компьютерное моделирование для расчета опорных дозовых распределений



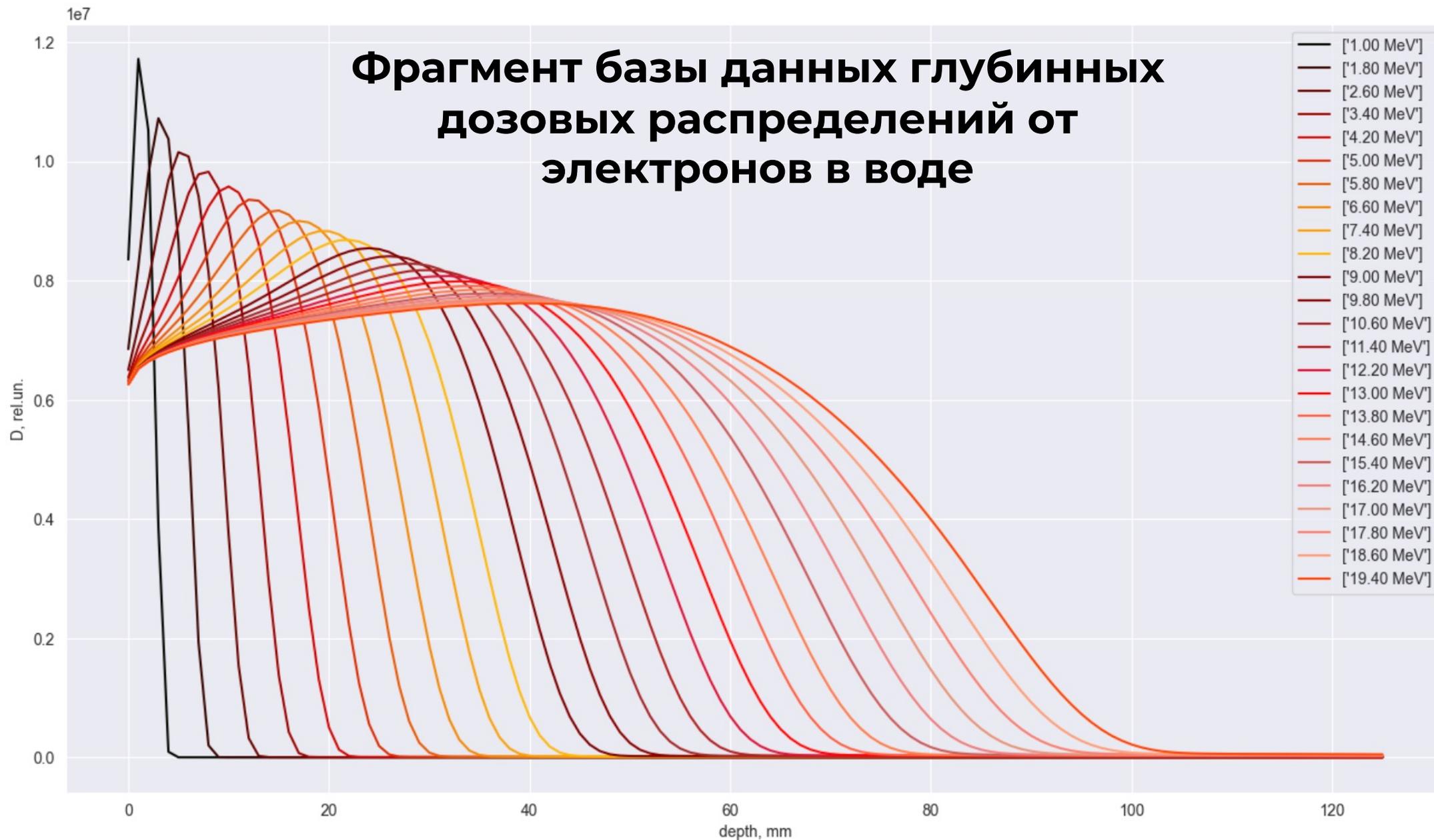
Параметры моделирования	
PhysicsList	QBBC-Livermore
Cut	0.1 mm
Размер фантома	200 x 200 x 200 mm
Размер слоя	1 mm
Статистика	1e7 частиц в каждом моделировании
Начальная энергия электронов	0.1 МэВ -> 20 МэВ; dE = 0.1 МэВ
Материал фантома	Вода, "Твердая вода", Алюминий

*"Твердая вода"* :  
Полистирол (C<sub>8</sub>H<sub>8</sub>)<sub>n</sub> - 97.9%  
Оксид титана TiO<sub>2</sub> - 2.1%

*Было проведено более  
600 моделирований*

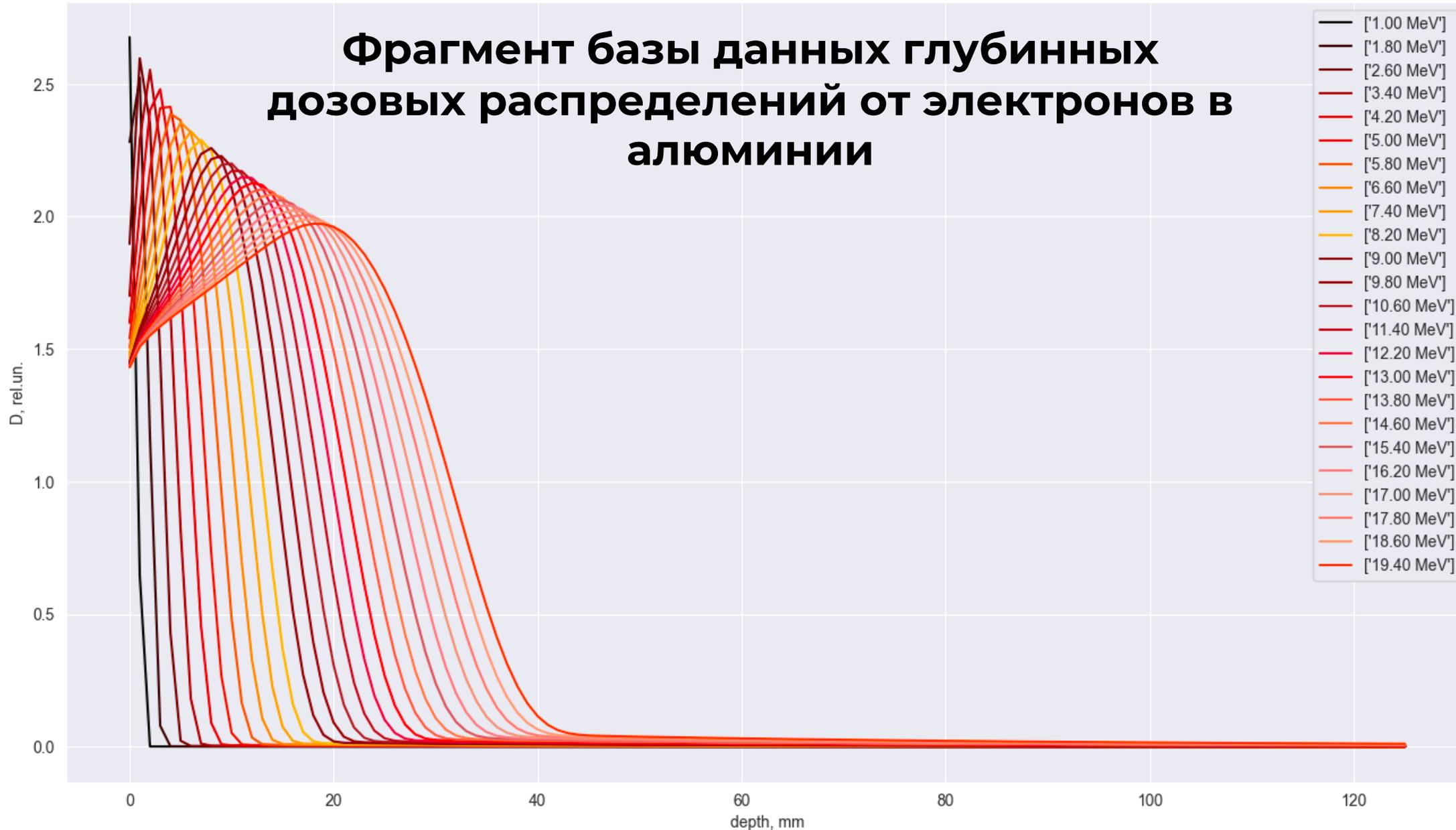


# Фрагмент базы данных глубинных дозовых распределений от электронов в воде

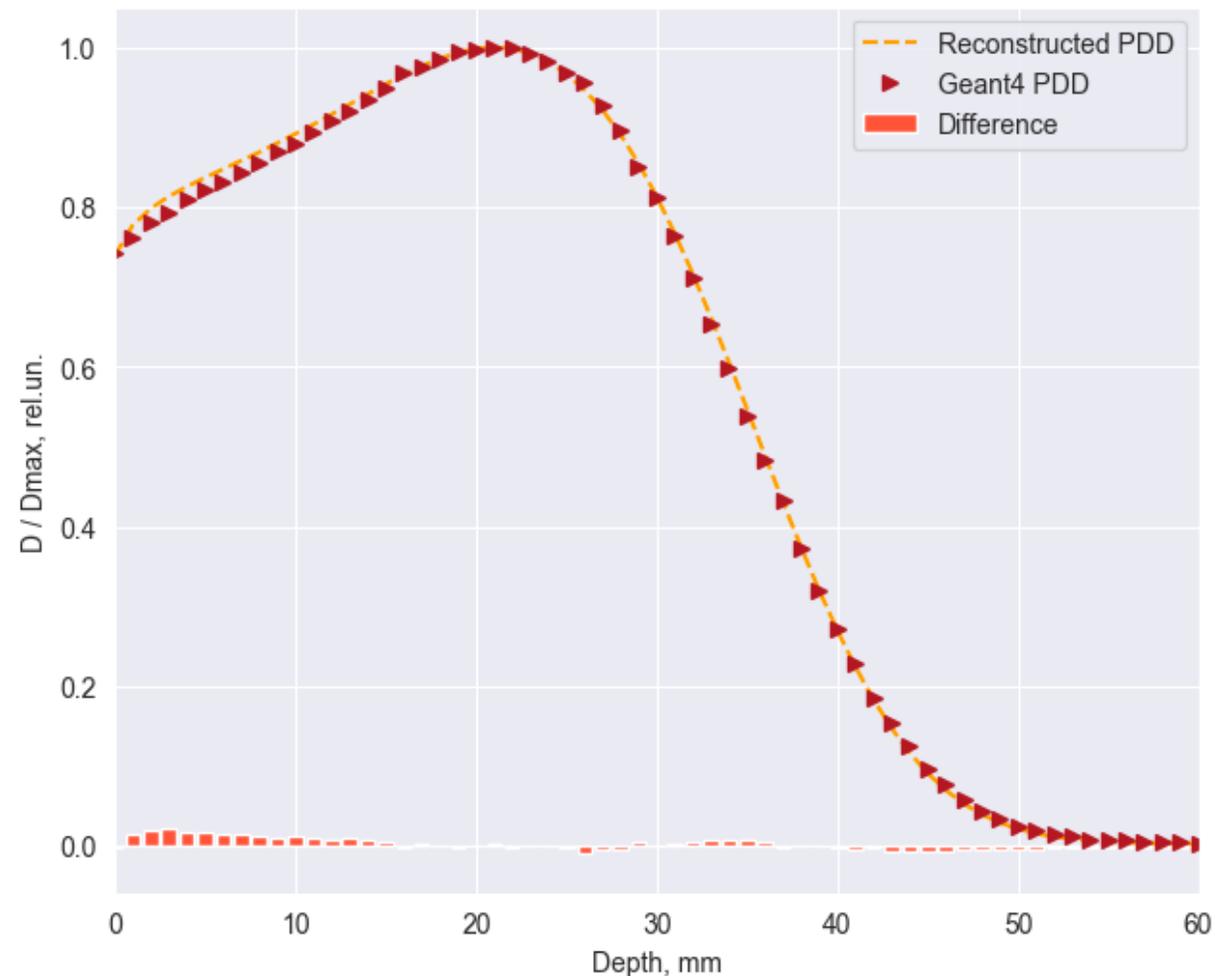
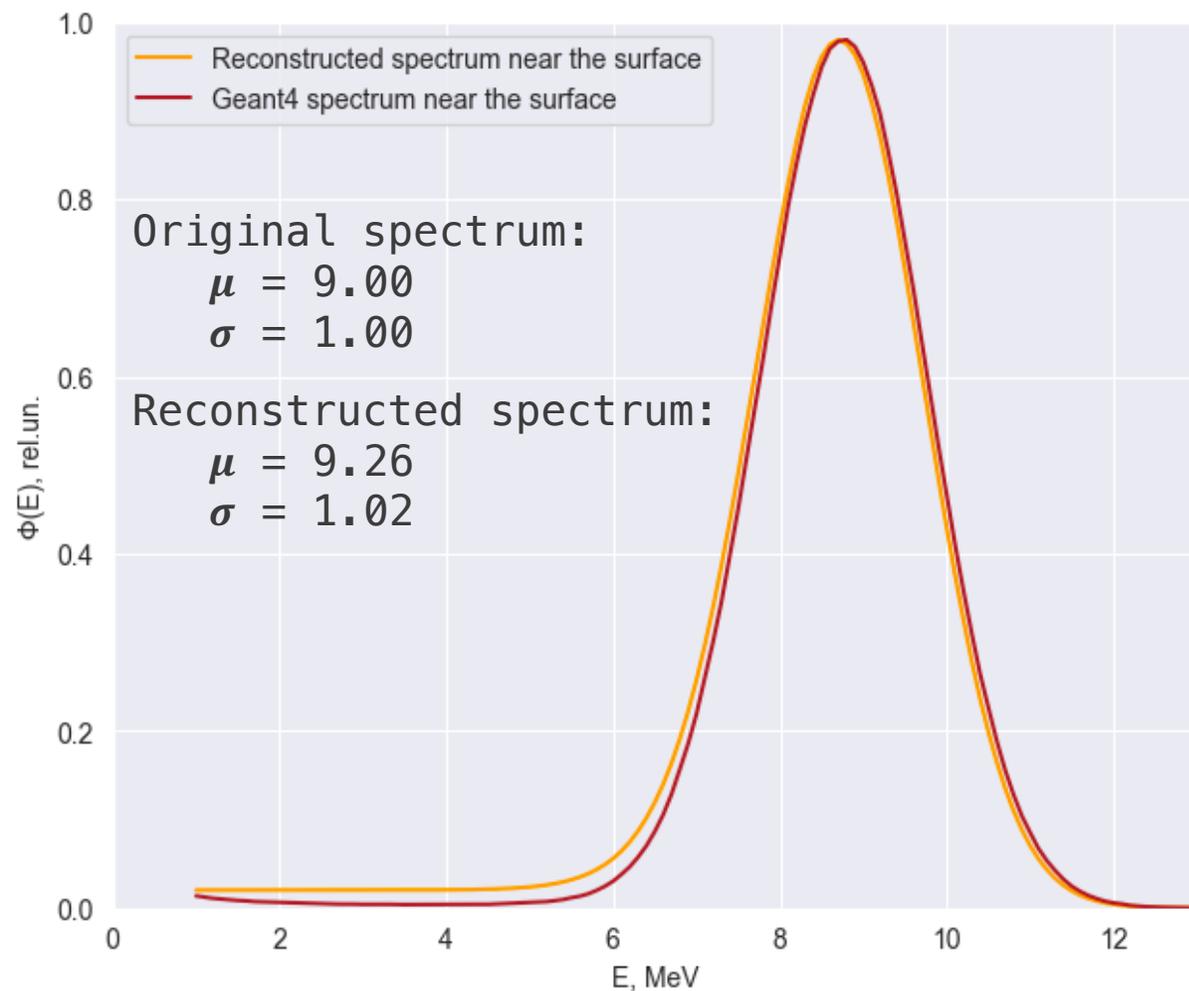


1e7

# Фрагмент базы данных глубинных дозовых распределений от электронов в алюминии

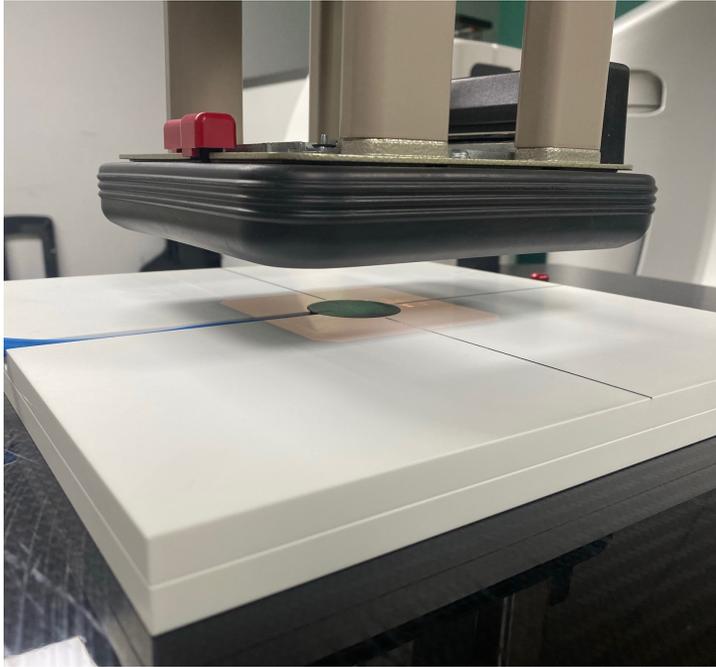


# Результаты виртуального эксперимента

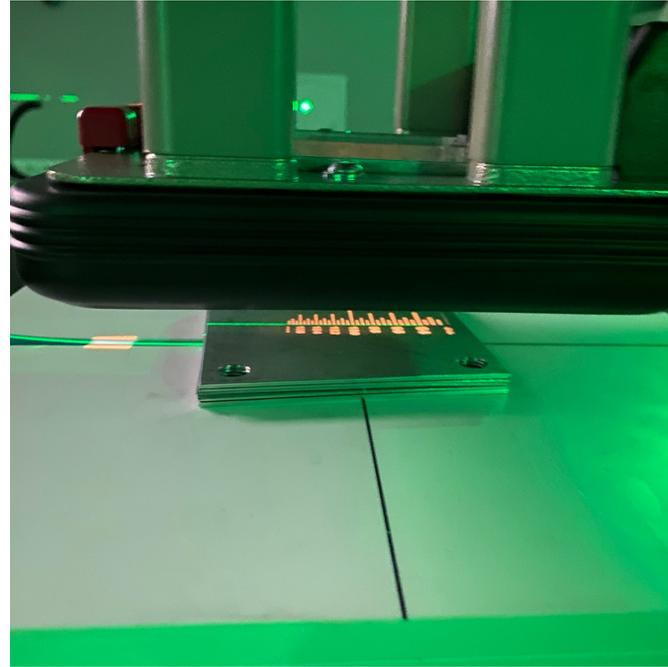


# Экспериментальная проверка алгоритма

Измерение PDD в твердой воде



Измерение PDD в алюминии

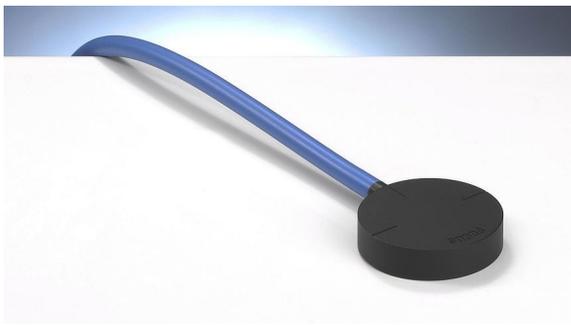


Для построения графиков глубинных распределений поглощенной дозы в алюминии и тканеэквивалентном материале использовался твердотельный фантом PTW RW3 Slab Phantom с ионизационной камерой Roos Chamber.

Расстояние от источника до поверхности (SSD), равное 100 см, также поддерживалось постоянным в течение эксперимента, что достигалось перемещением стола, на котором находился фантом.

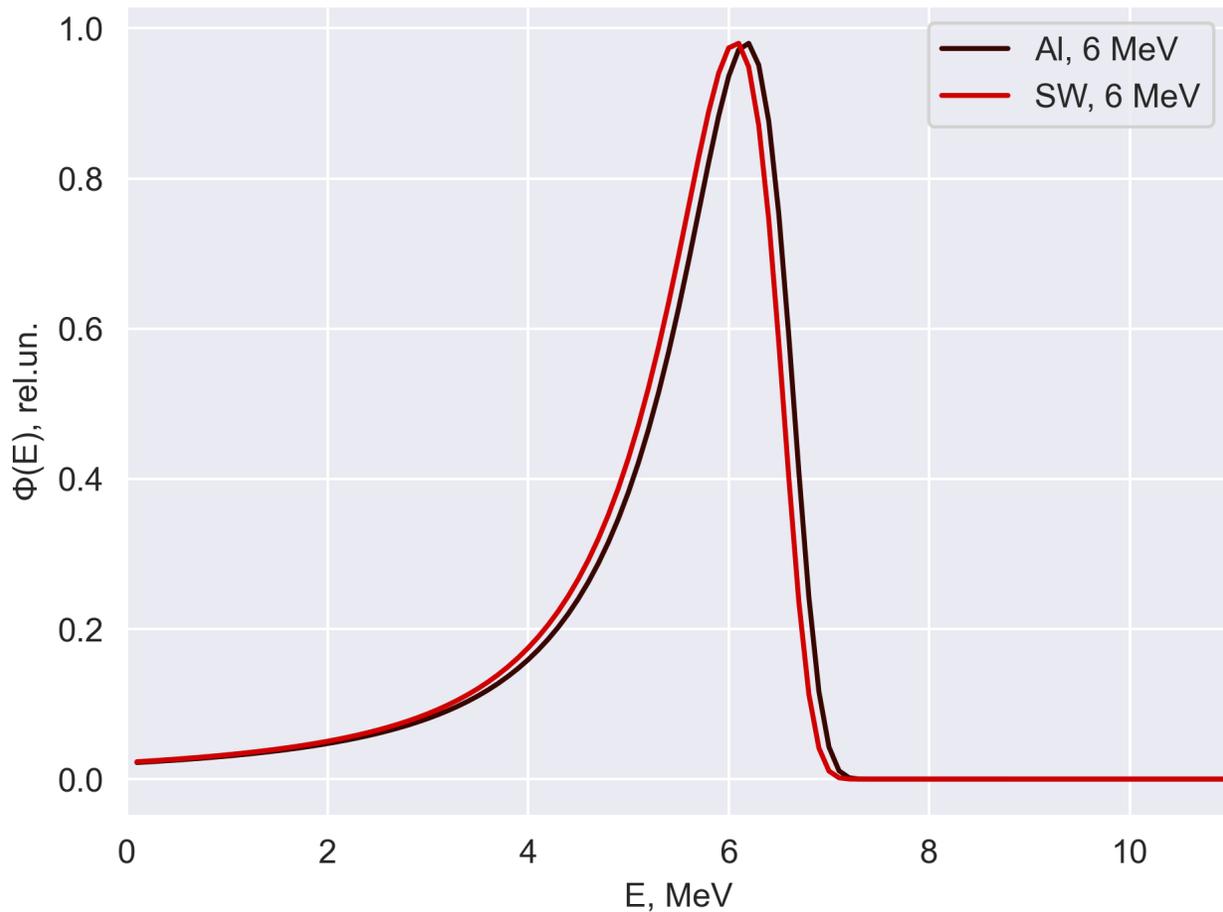
## Roos Chamber Ionisation chamber

- Sensitive volume:  $0.35 \text{ cm}^3$
- Temperature range:  $10 - 40 \text{ }^\circ\text{C}$
- Measurement accuracy: 0.5%
- Time resolution:  $125 \text{ } \mu\text{s}$

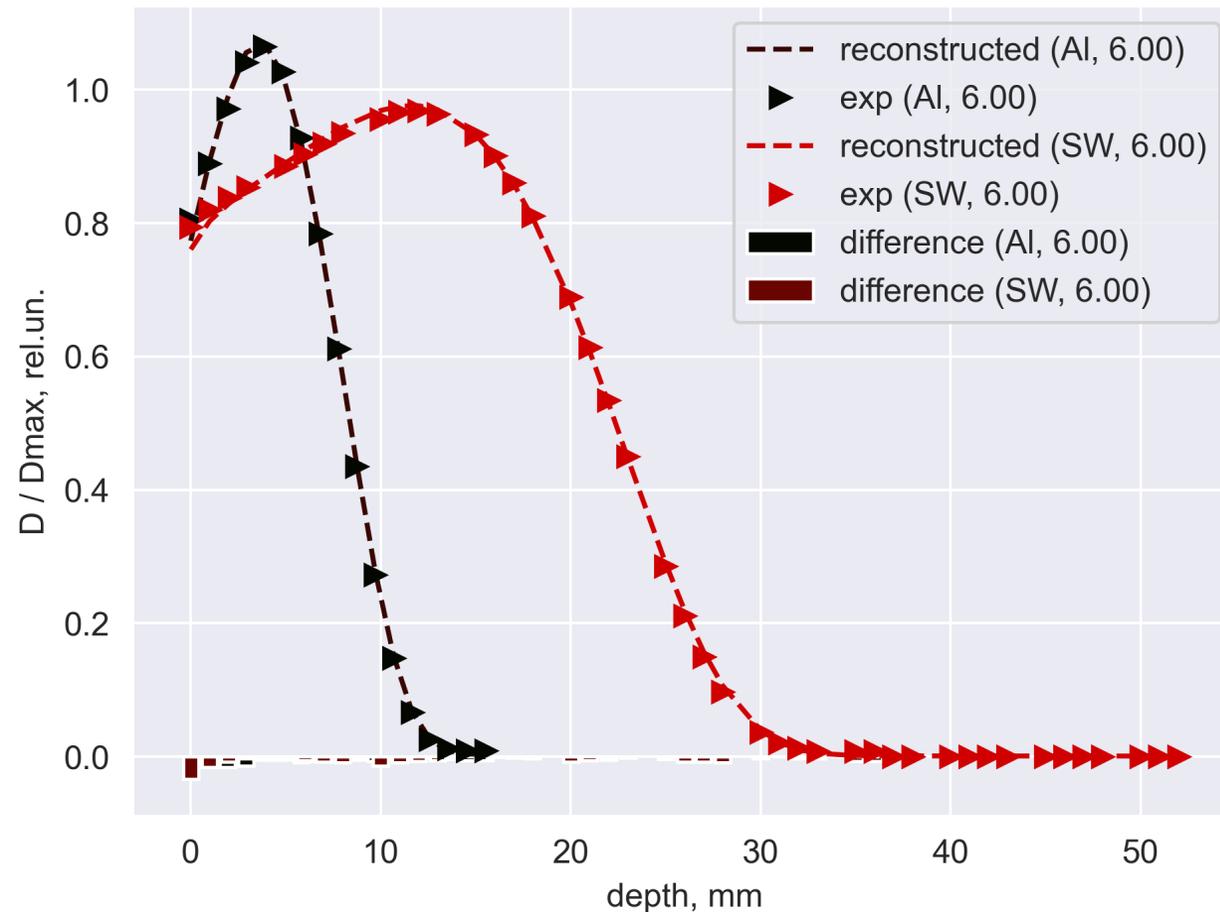


# Результаты 6 МэВ

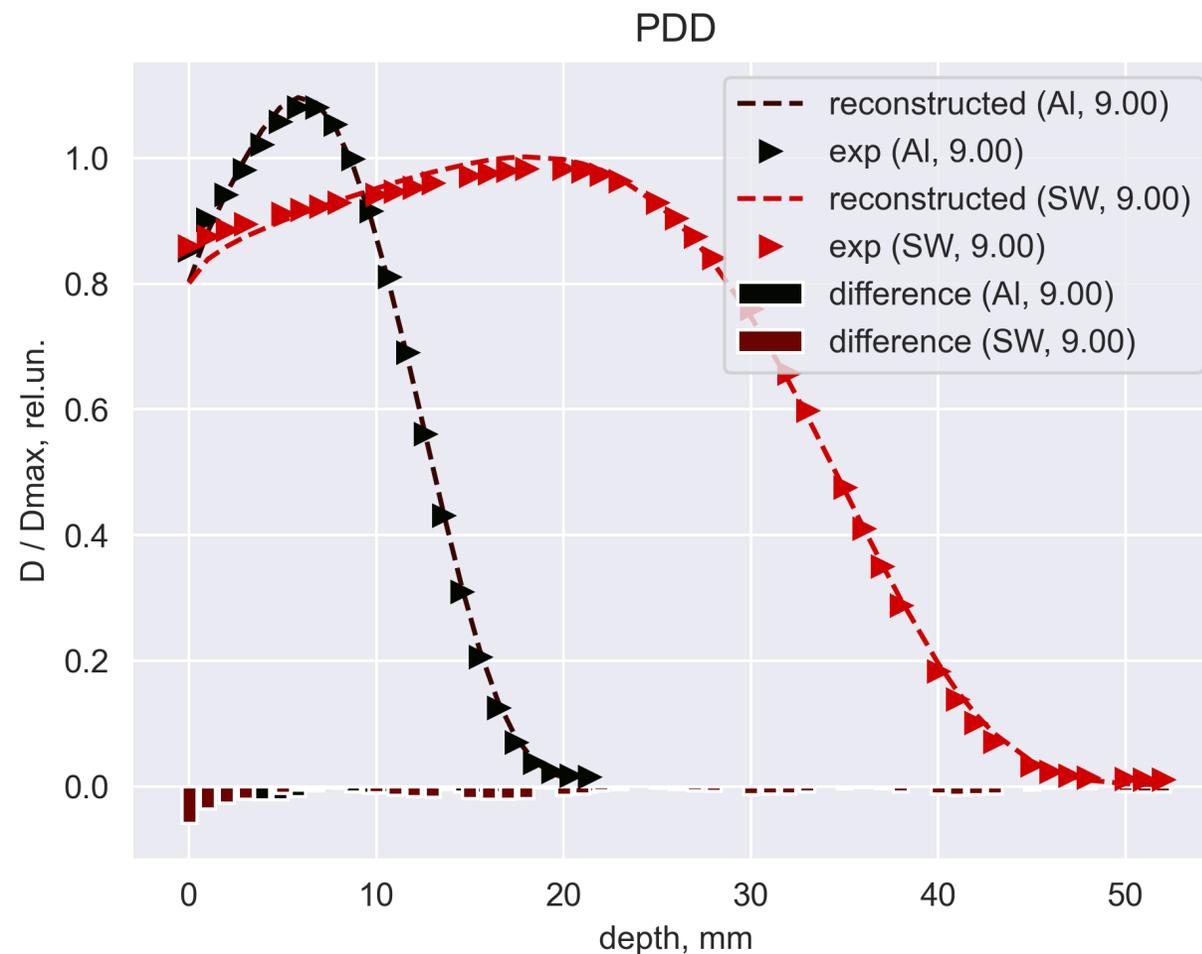
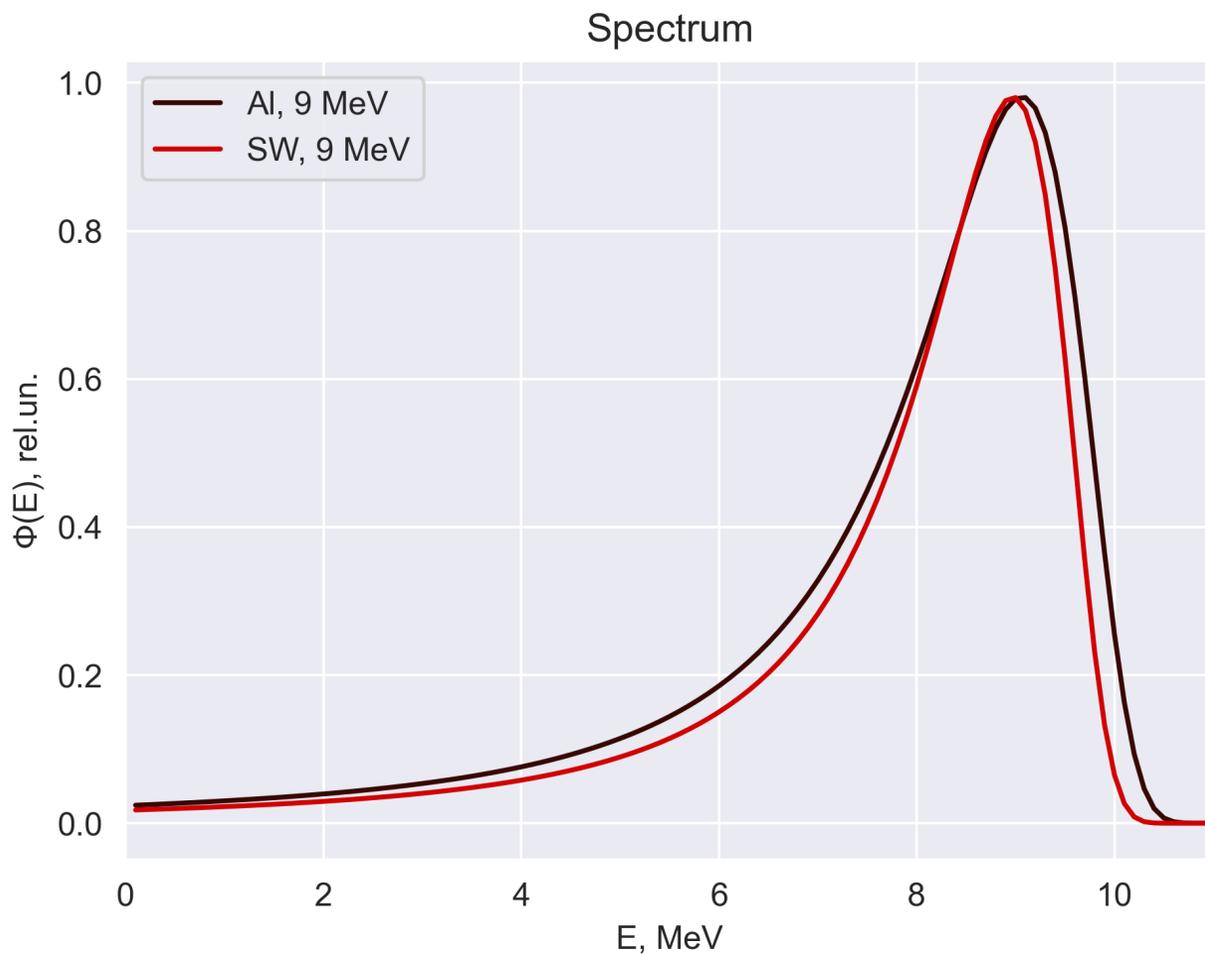
Spectrum



PDD



# Результаты 9 МэВ



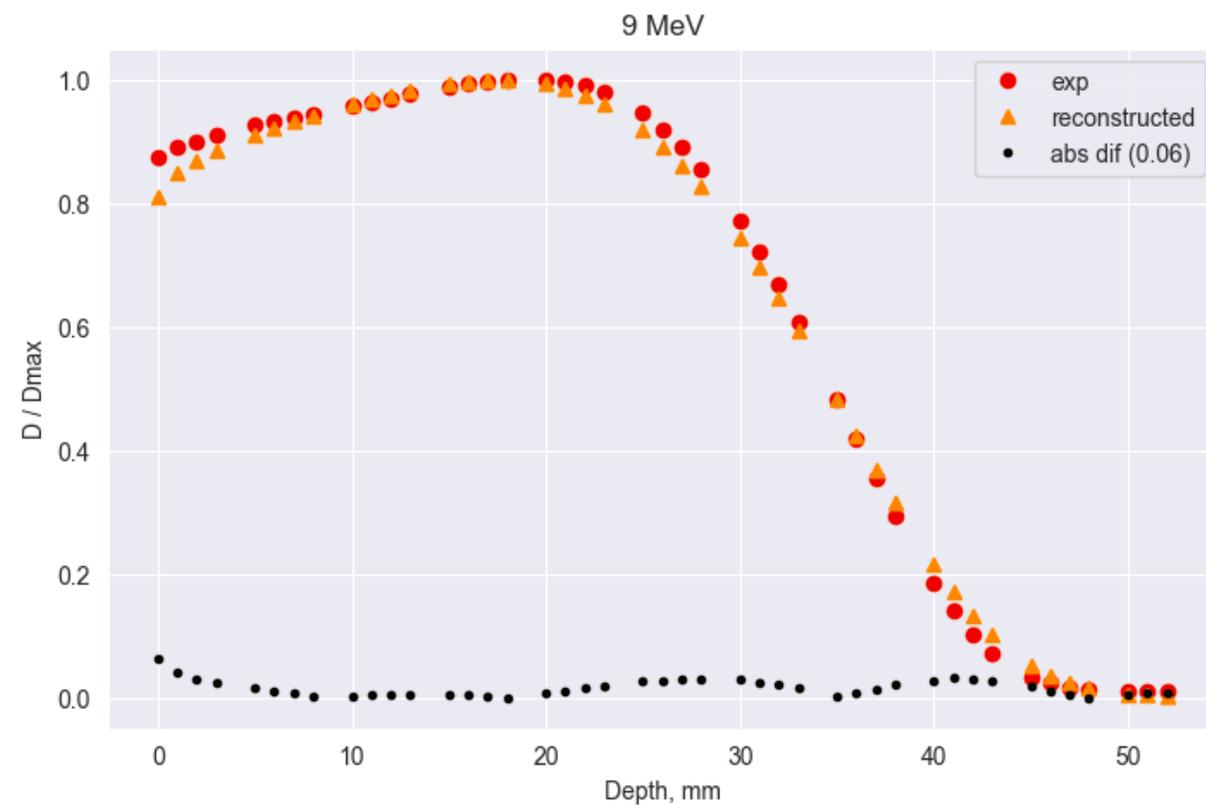
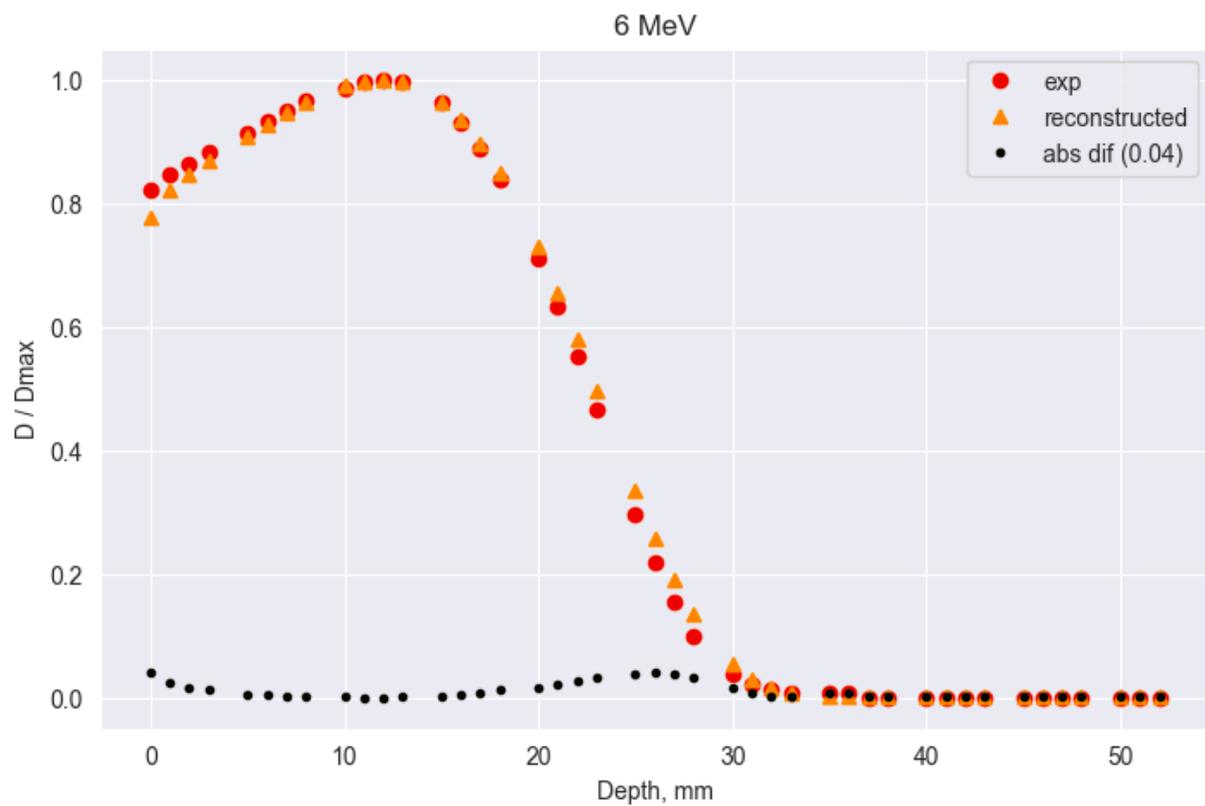
# Сводная таблица параметров восстановленных спектров

Режим работы ускорителя	E (тв. вода)	E (AI)
6 МэВ	5.95	5.85
9 МэВ	8.68	8.65

Режим работы ускорителя	E (тв. вода)	E (AI)
6 МэВ	0.03	0.02
9 МэВ	0.03	0.03

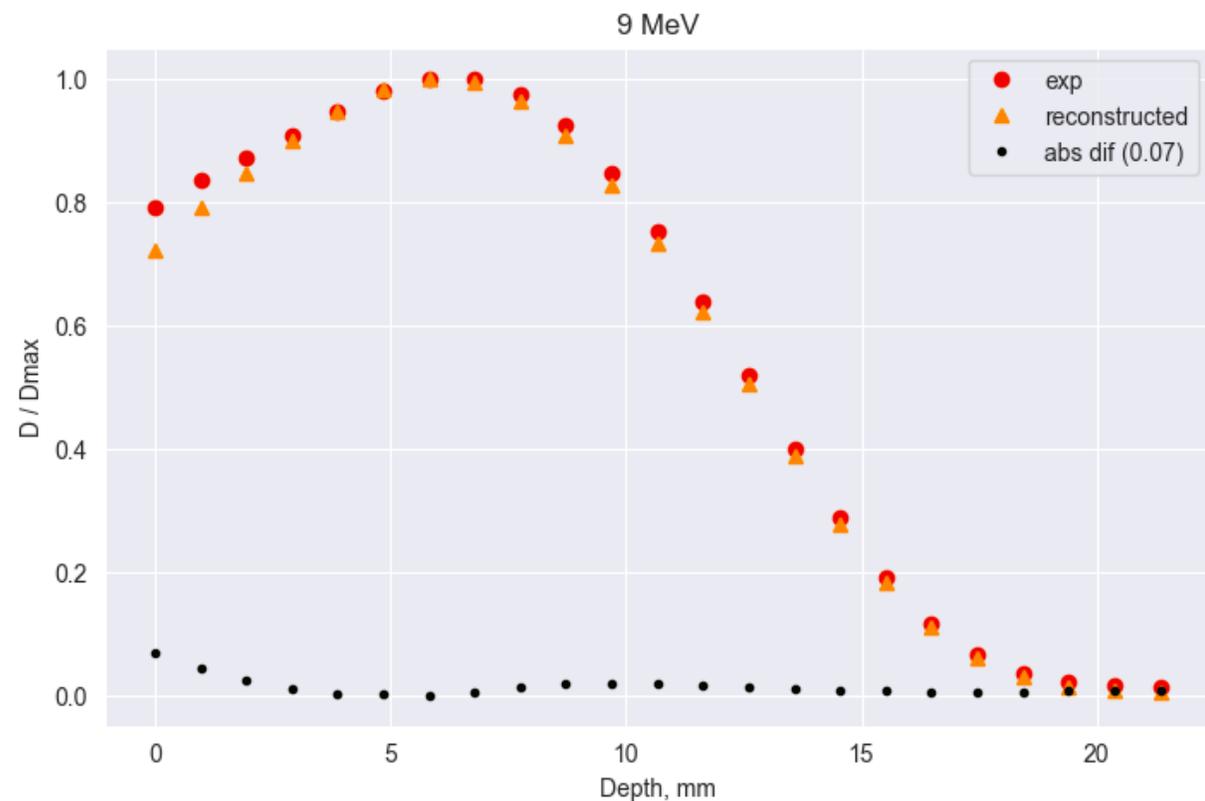
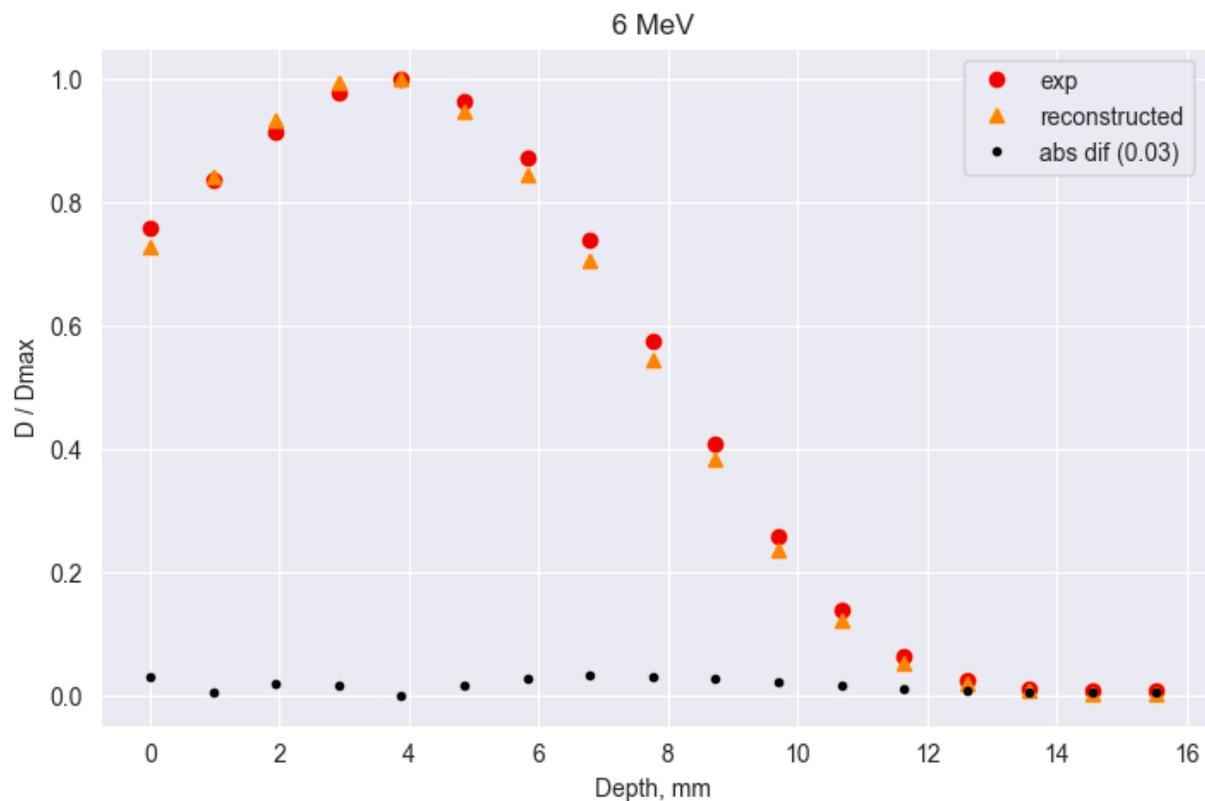
# Пересчет глубинных дозовых распределений с использованием восстановленного спектра Алюминий -> тв. вода

Al -> SW



# Пересчет глубинных дозовых распределений с использованием восстановленного спектра Тв. вода -> алюминий

SW -> Al



# DosePreview by IRT

## Для быстрой оценки равномерности облучения



Небезопасно — industrial-rt.ru

Sign out

### Энергетический спектр

$N(E)$

$N(E) / N_{sum}$

E, MeV

Выбрать файл файл не выбран

Построить PDD

Введите интересующий диапазон глубин (мм)

0 - 50

### Распределение поглощённой дозы

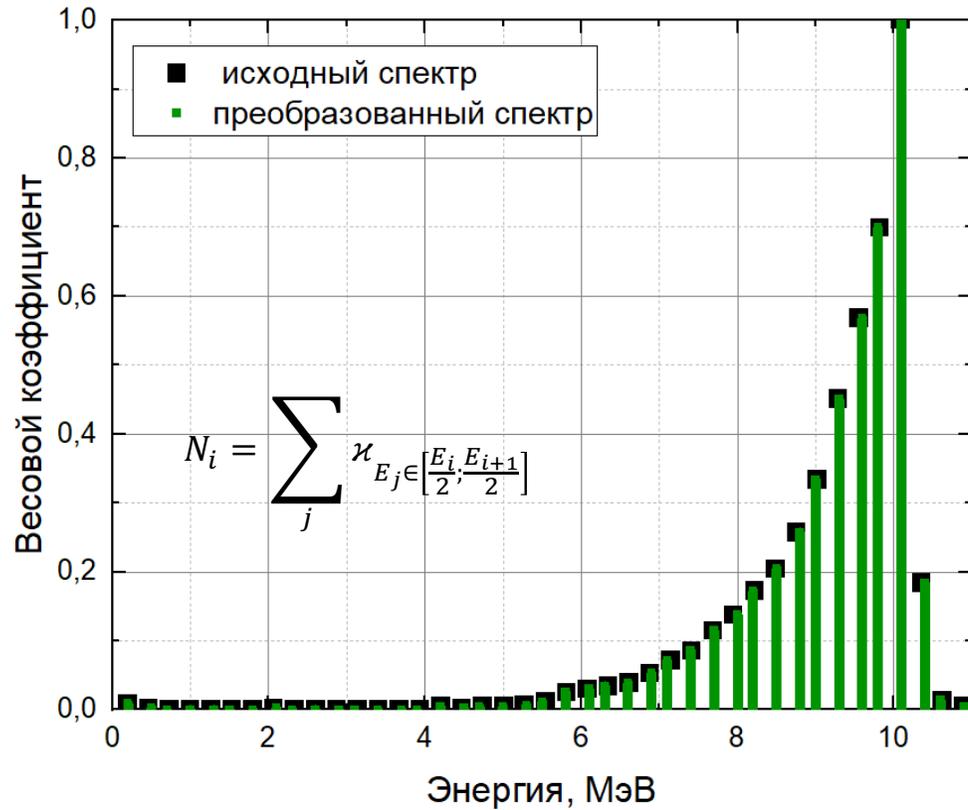
$D$

PDD

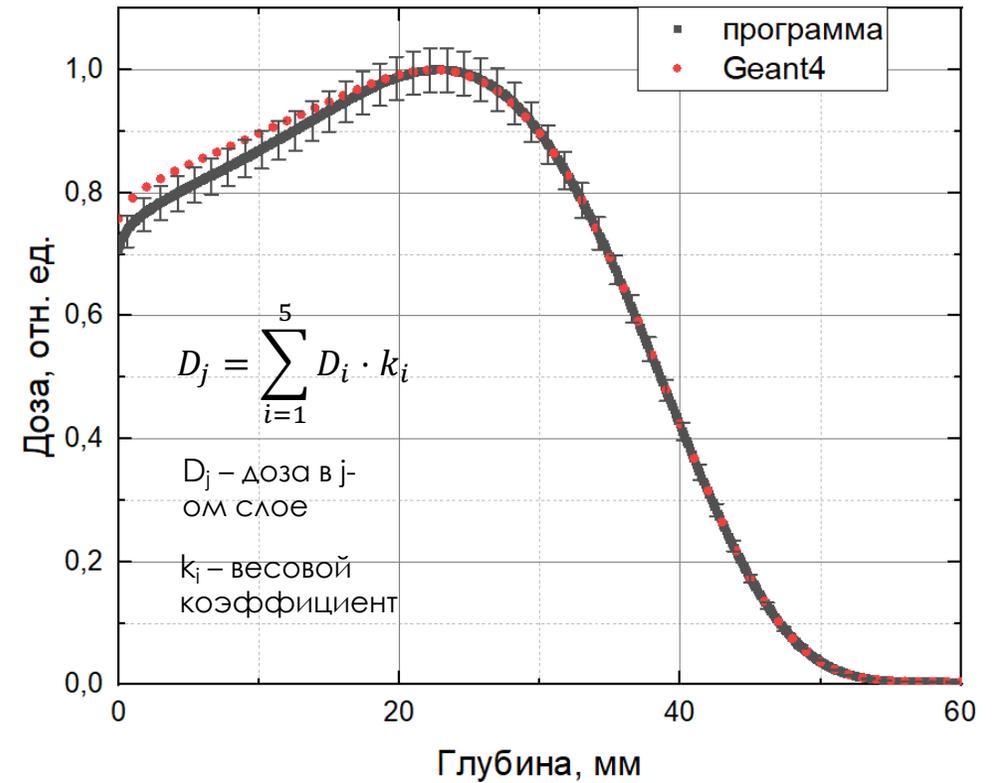
Depth, mm



# Облучение объектов пучками электронов с заданным энергетическим спектром

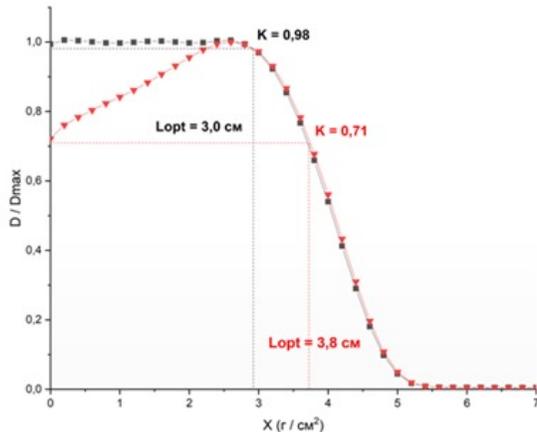
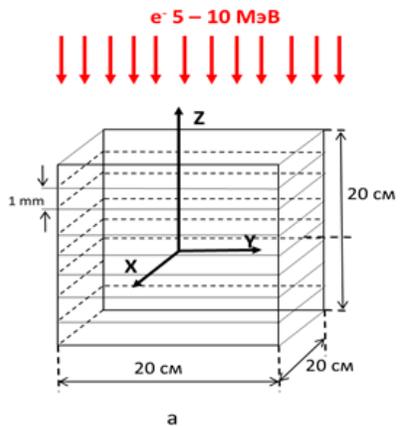


Спектр линейного ускорителя импульсного действия, разработанный сотрудниками ОЭПВАЯ НИИЯФ МГУ

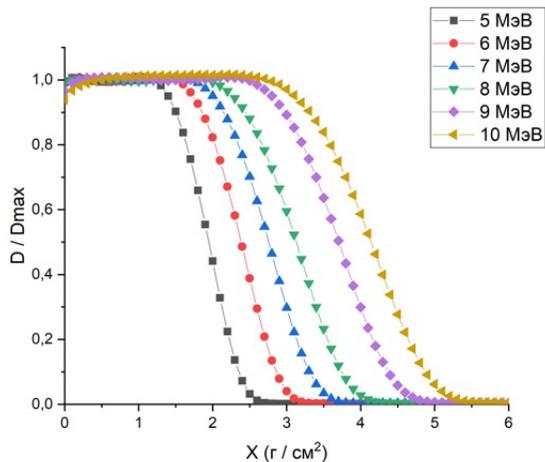
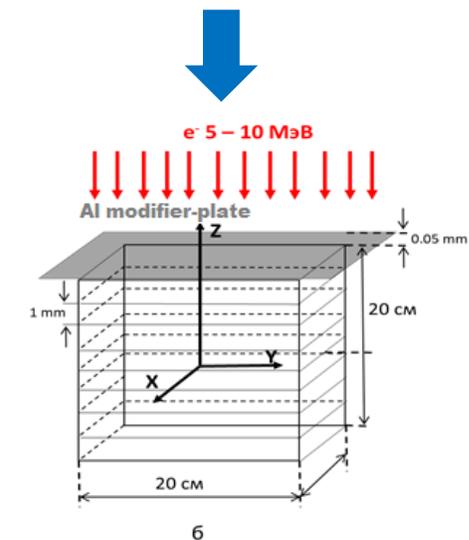
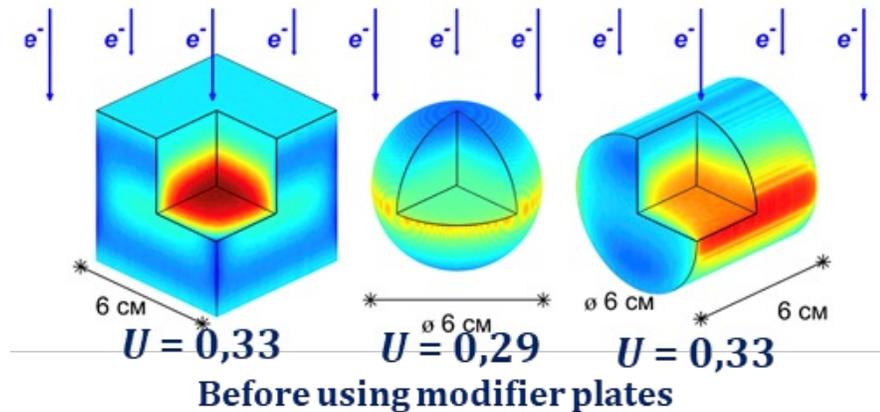


Сравнение полученных при моделировании с использованием Geant4 и разработанной программы распределений поглощенной дозы при облучении параллелепипеда из воды толщиной 6 см электронами с заданным спектром энергии

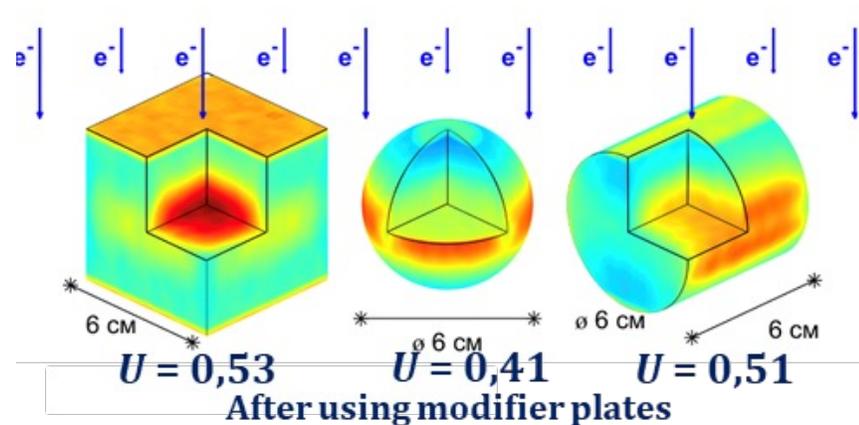
# Повышение однородности



Irradiation without modifier plates

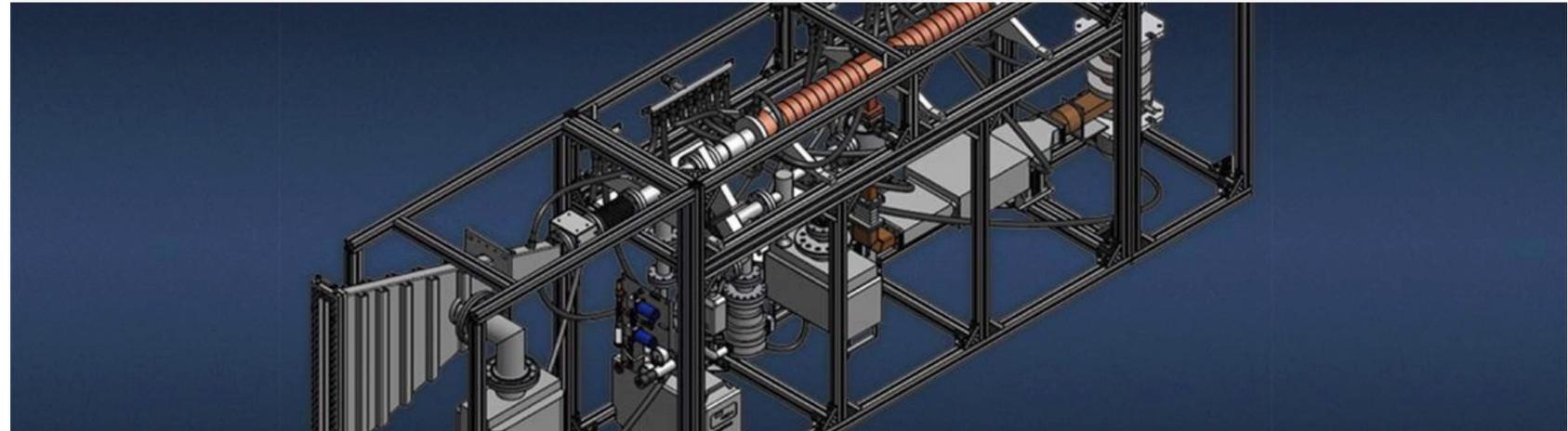
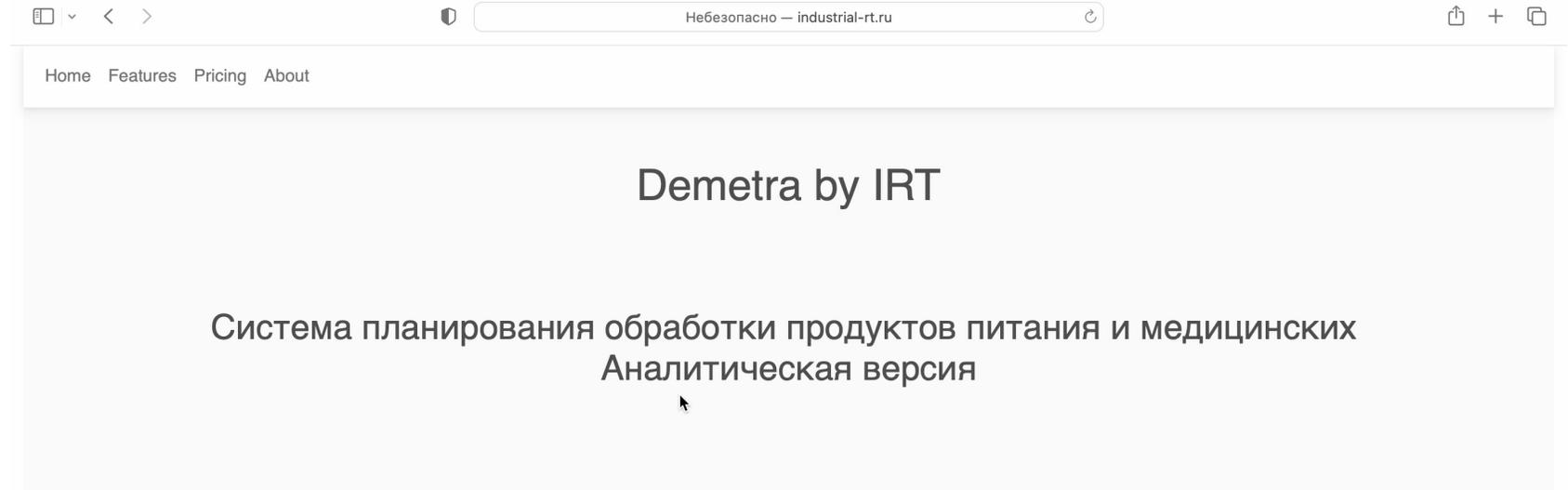


Irradiation with modifier plates





# Demetra by IRT совместно с ЛЭУ МГУ Для расчета параметров ускорителя





Золотов Сергей Александрович  
zolotov.sa15@physics.msu.ru  
+7 920 765 87 92

# Purpose of work

To develop an algorithm that allows, using a set of analytically calculated depth distributions of absorbed dose in the reference material, to reconstruct the energy spectrum of the electron beam from the experimentally measured depth distribution of absorbed dose.

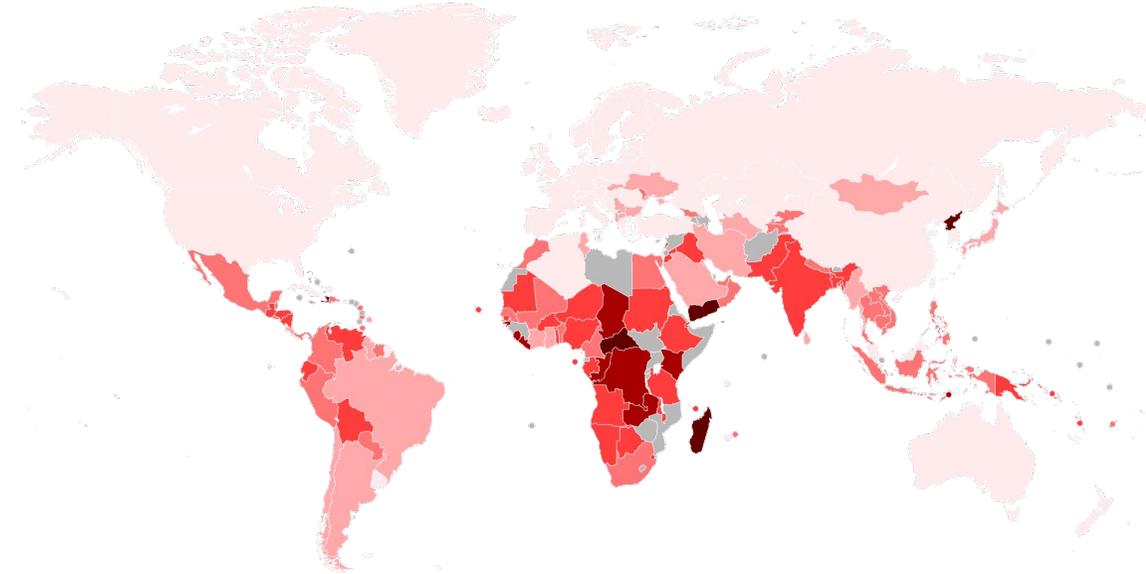
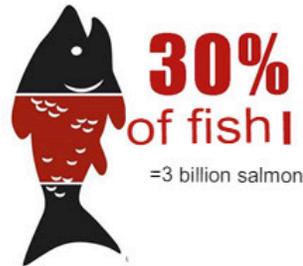
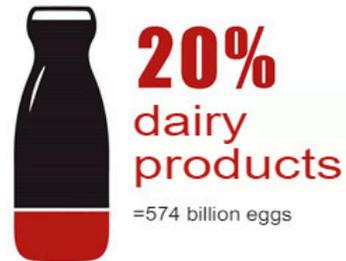
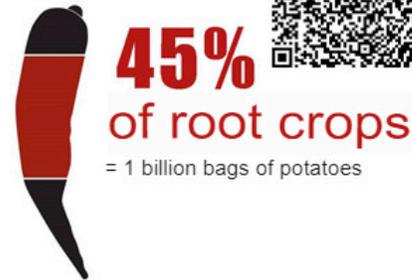
## Objectives

- Calculate a database of depth distributions of absorbed dose in water, aluminium and plastic produced by electrons with energies from 0.1 MeV to 10 MeV with a step of 0.1 MeV
- To develop an algorithm to reconstruct the energy spectrum of the electron beam from the depth distribution of the absorbed dose
- Carry out experimental verification of the algorithm

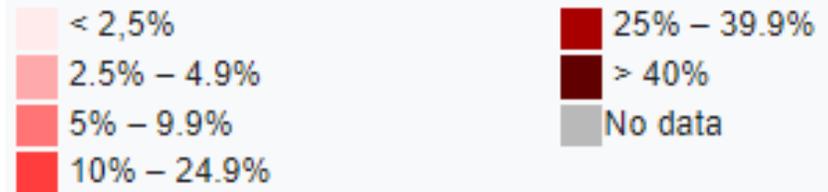
# Relevance of radiation treatment technology

According to the UN FAO, approximately one third of all food produced in the world (1.3 billion tonnes)<sup>1</sup> is lost each year

Annual food waste and losses in the world



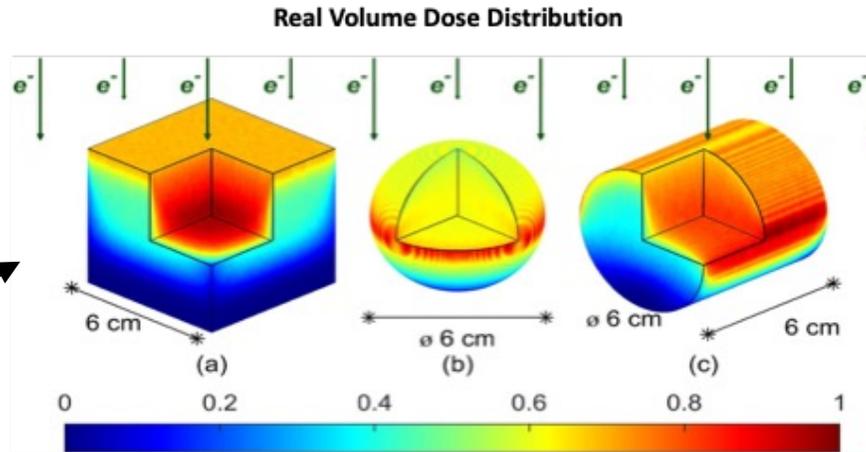
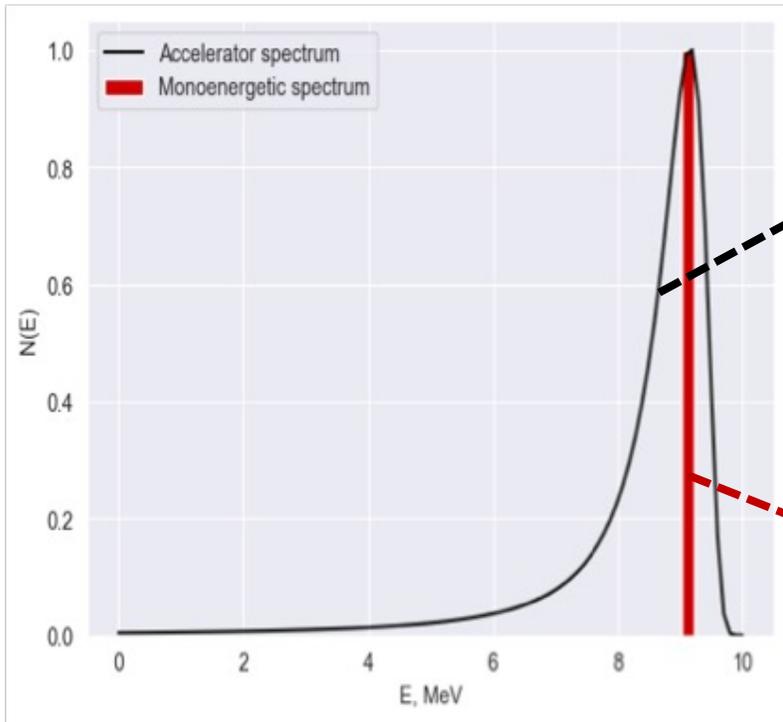
Map of countries by percentage of people suffering from chronic hunger (FAO, 2022)<sup>2</sup>



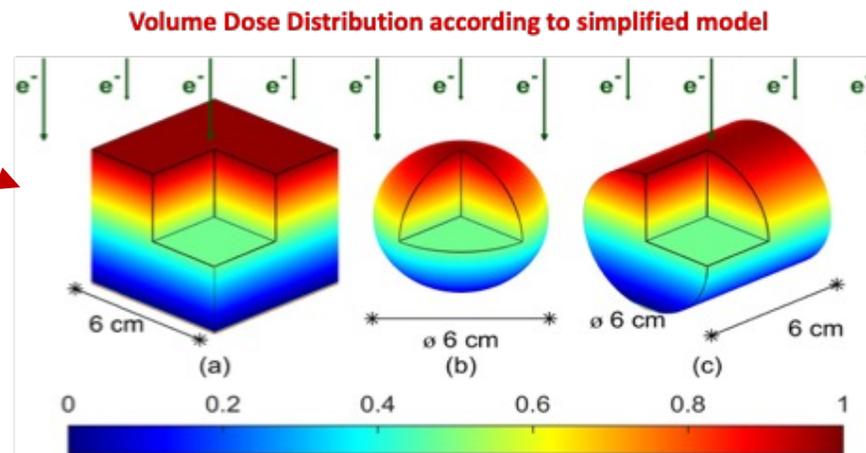
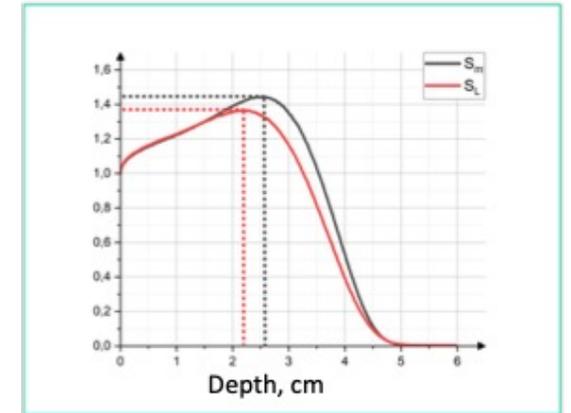
<sup>1</sup> FAO. 2019. The State of Food and Agriculture. A course to reduce food loss and spoilage. Rome <https://www.fao.org/3/ca6030ru/ca6030ru.pdf>

<sup>2</sup> FAO 2022 <https://www.oxfam.org/en/press-releases/humanitarian-organizations-estimate-one-person-dying-hunger-every-four-seconds>

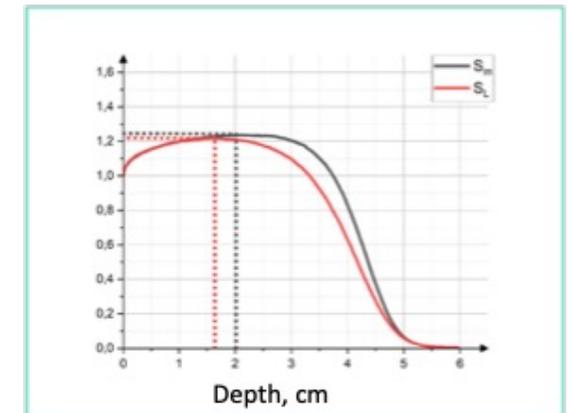
# Importance of radiation treatment planning



Depth dose distribution over cubic phantom



Depth dose distribution over orb phantom

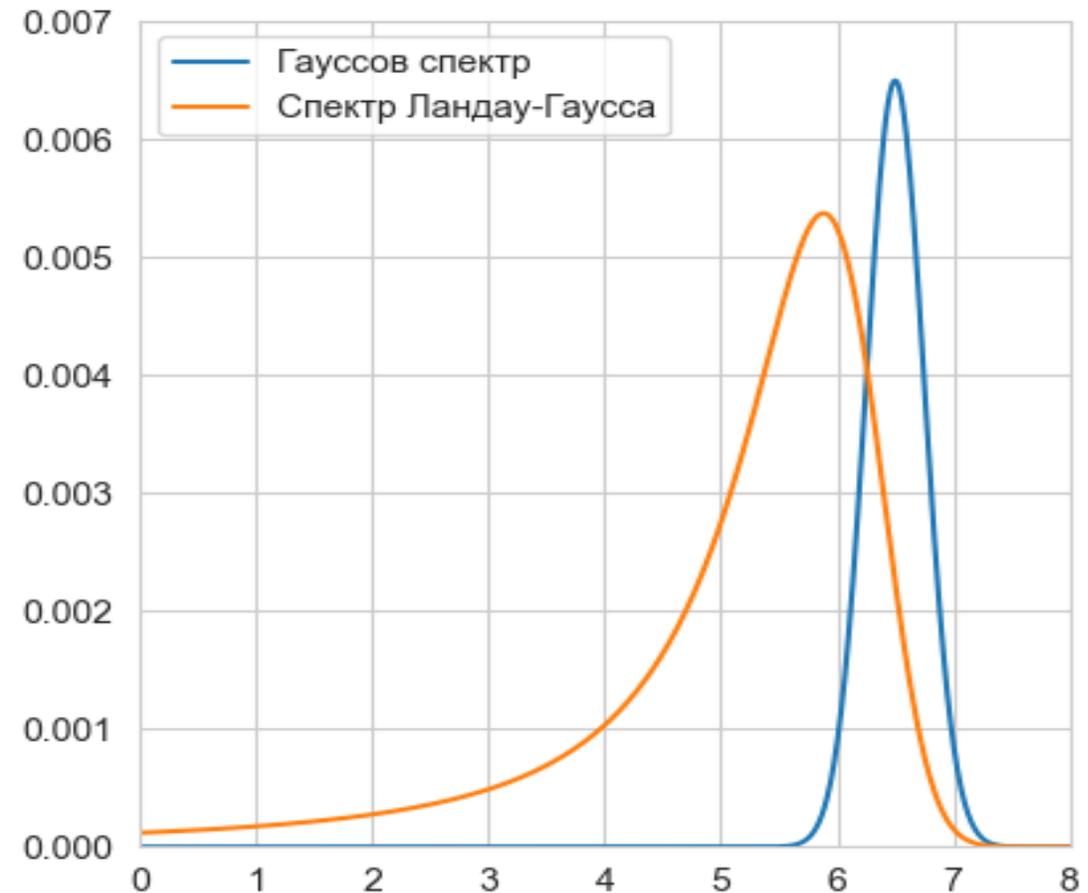
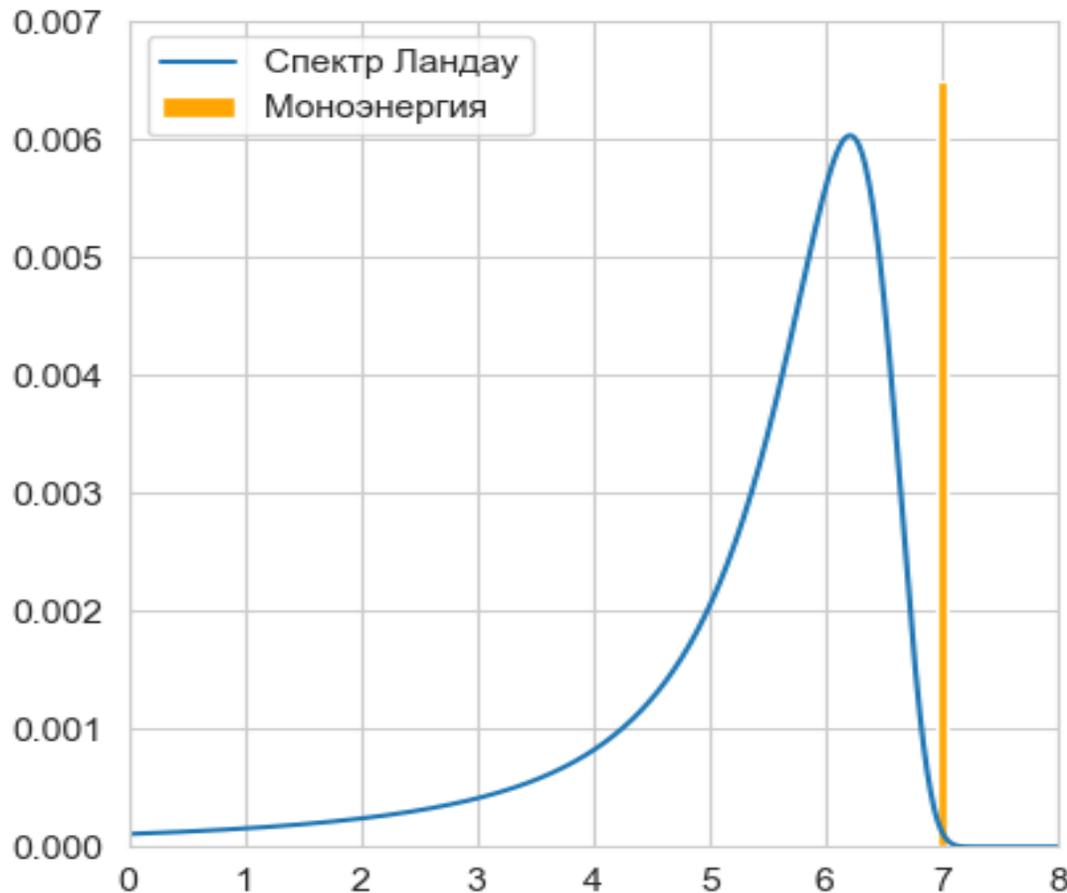


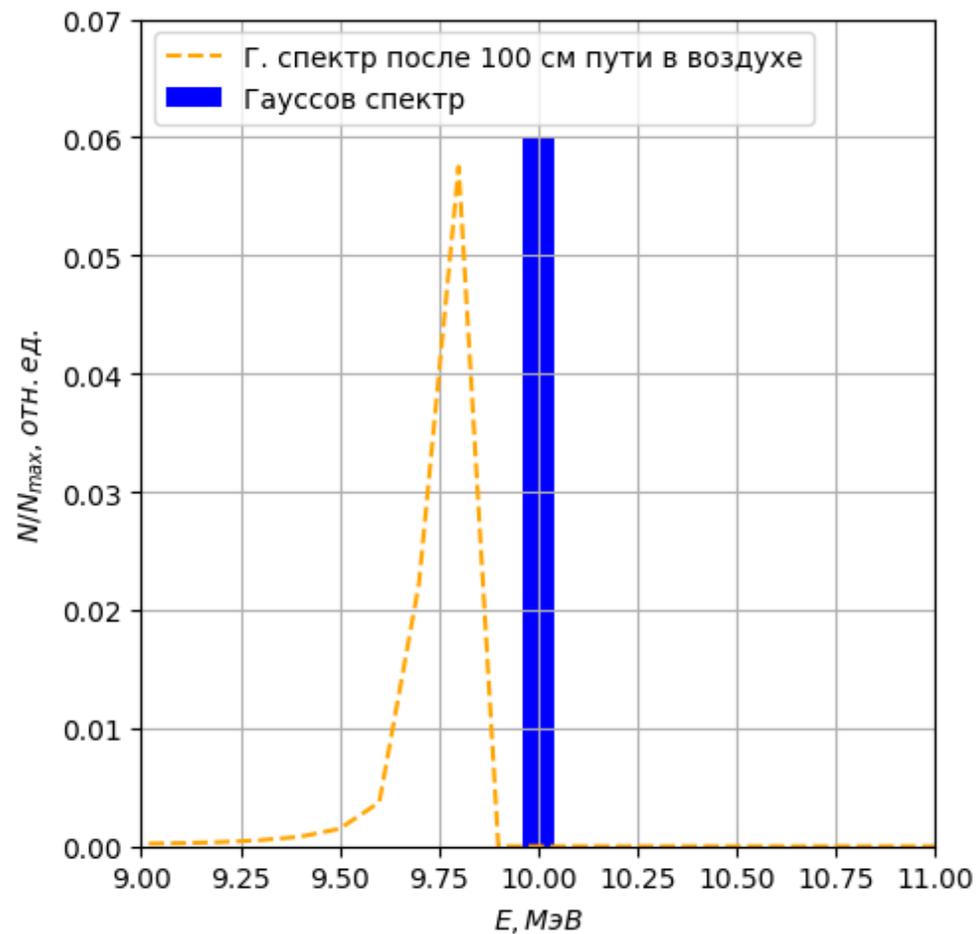
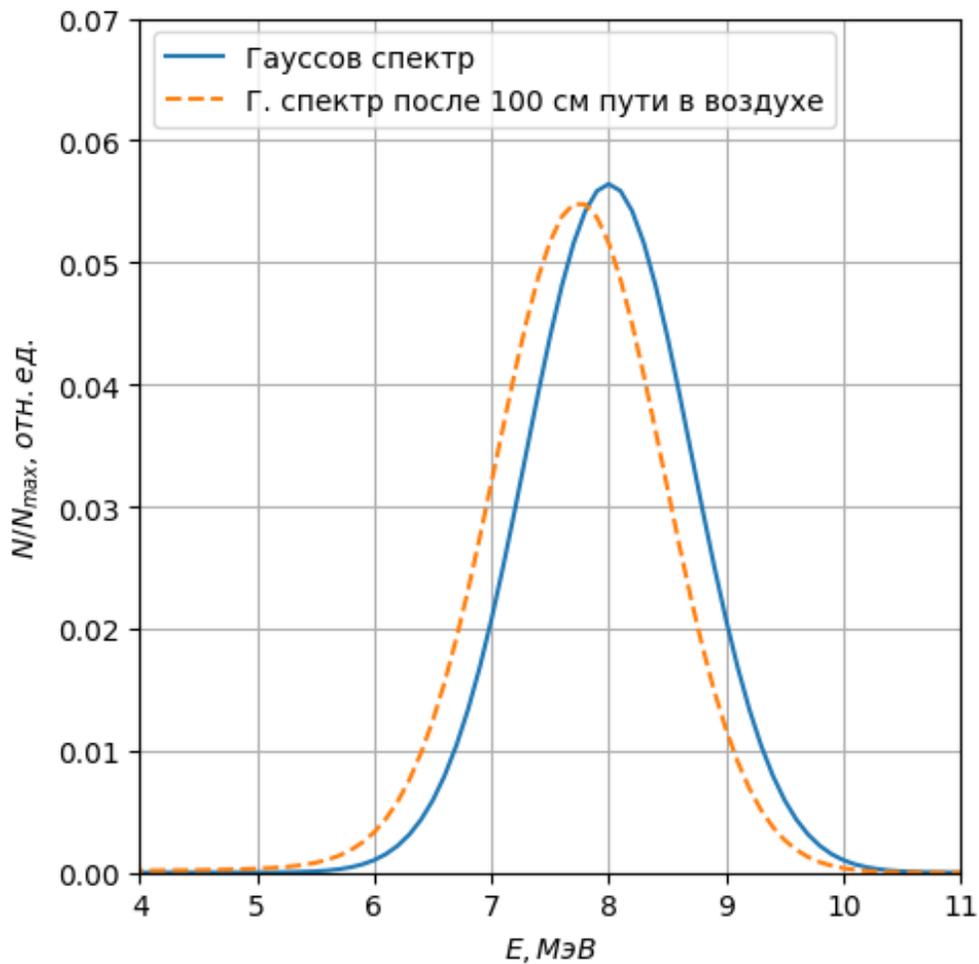
# Эволюция энергетического спектра с помощью распределения Ландау

$$\Phi(E, L) = \int_0^{E_{max}} \Phi_0(\epsilon) a(\epsilon, L) \lambda\left(\frac{\alpha(L)E - \beta(L) - \epsilon}{b(\epsilon, L)}\right) d\epsilon$$

$$\Lambda(E, E_0, L) = a(E_0, L) \lambda\left(\frac{\alpha(L)E_0 + \beta(L) - E}{b(E_0, L)}\right)$$

$$\lambda(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \exp(-t \log(t) - xt) \sin(\pi t) dt$$



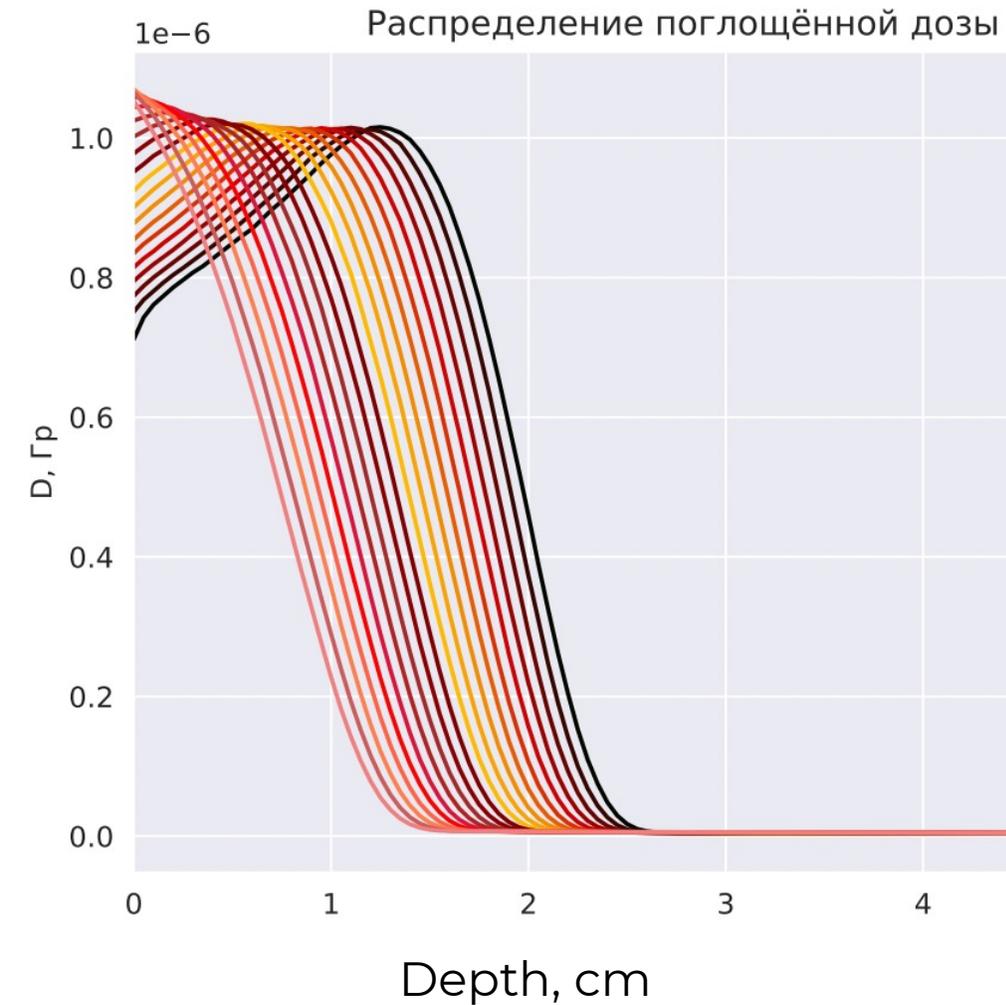


$$\frac{\alpha(L)E - \beta(L) - \epsilon}{b(\epsilon, L)} d$$

$$\Lambda(E, E_0, L) = a(E_0, L) \lambda\left(\frac{\alpha(L)E_0 + \beta(L) - E}{b(E_0, L)}\right)$$

$$\lambda(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \exp(-t \log(t) - xt) \sin(\pi t) dt$$

# Algorithm principle



$$\begin{cases} \sum_{j=1}^N d_1^{i,j} a^j = D_1^i \\ \sum_{j=1}^N d_2^{i,j} a^j = D_2^i \end{cases}$$

$a_j$  - a set of energies representing the initial spectrum of the electron beam  
 $D_{material}^i$  - experimentally measured dose created by the beam at depth  $i$  in material.

Goal:  $\sum_{j=1}^N (d_{ref}^{i,j} w^j - D_{ref}^i)^2 \rightarrow \min$

Verification:  $\sum_{j=1}^N (d_{exp}^{i,j} w^j - D_{ver}^i)^2 \rightarrow \min,$

where  $w^j$  is the calculated spectrum,  $D_{ref}^i$ ,  $D_{ver}^i$  are the experimentally measured depth distributions of absorbed dose in the reference and verification materials, respectively,  $d_{ref}^{i,j}$ ,  $d_{ref}^{i,j}$ ,  $d_{ref}^{i,j}$  are the analytically calculated depth distributions of absorbed dose in the reference and verification materials, respectively.

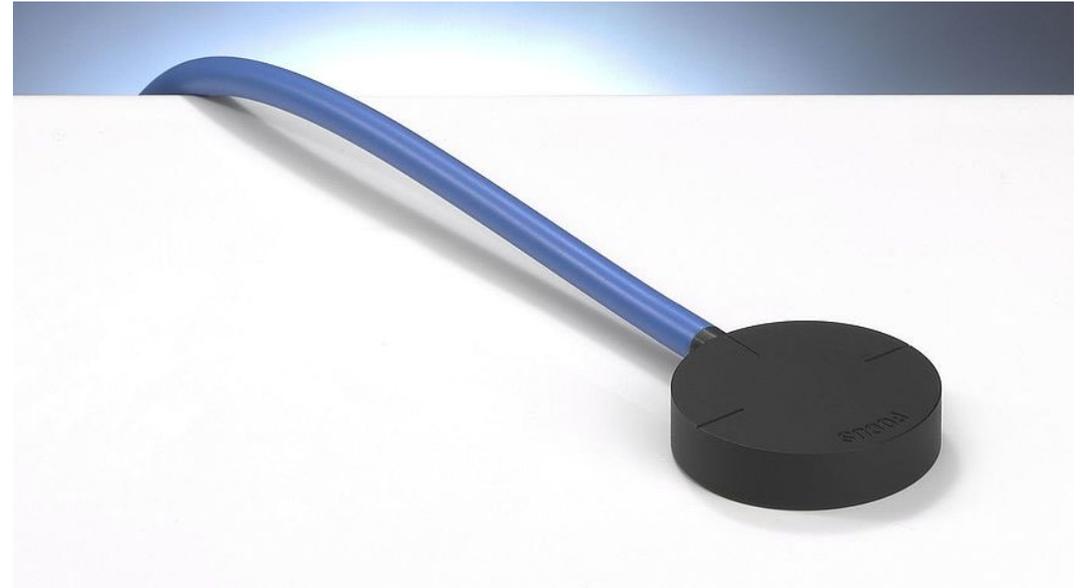
Evaluating the accuracy of the algorithm :  $\delta D_{rest} = \frac{\|D_2 - \bar{D}_2\|}{\|D_2\|}$

# Измерение поглощенной дозы



Ионизационная камера  
Semiflex 3D (для водного фантома)

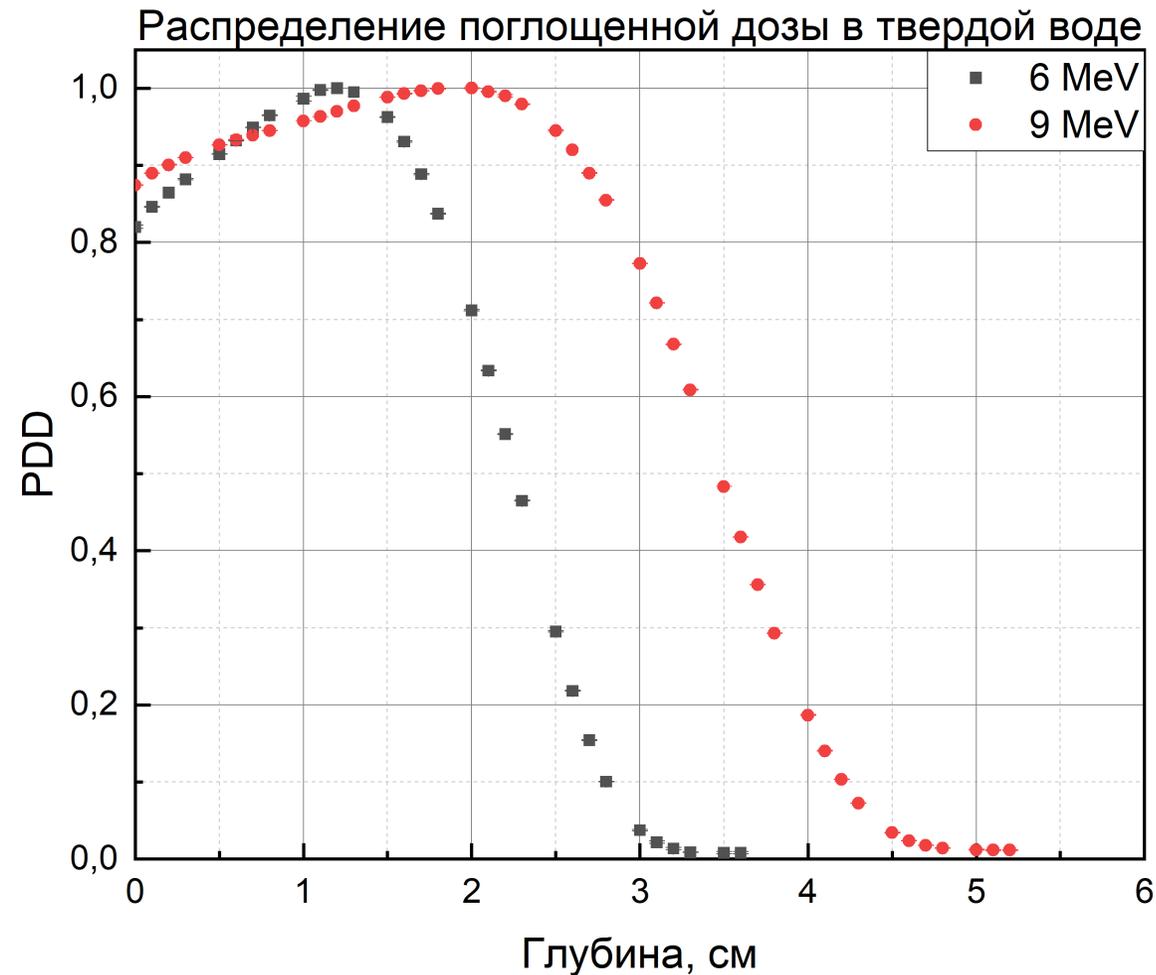
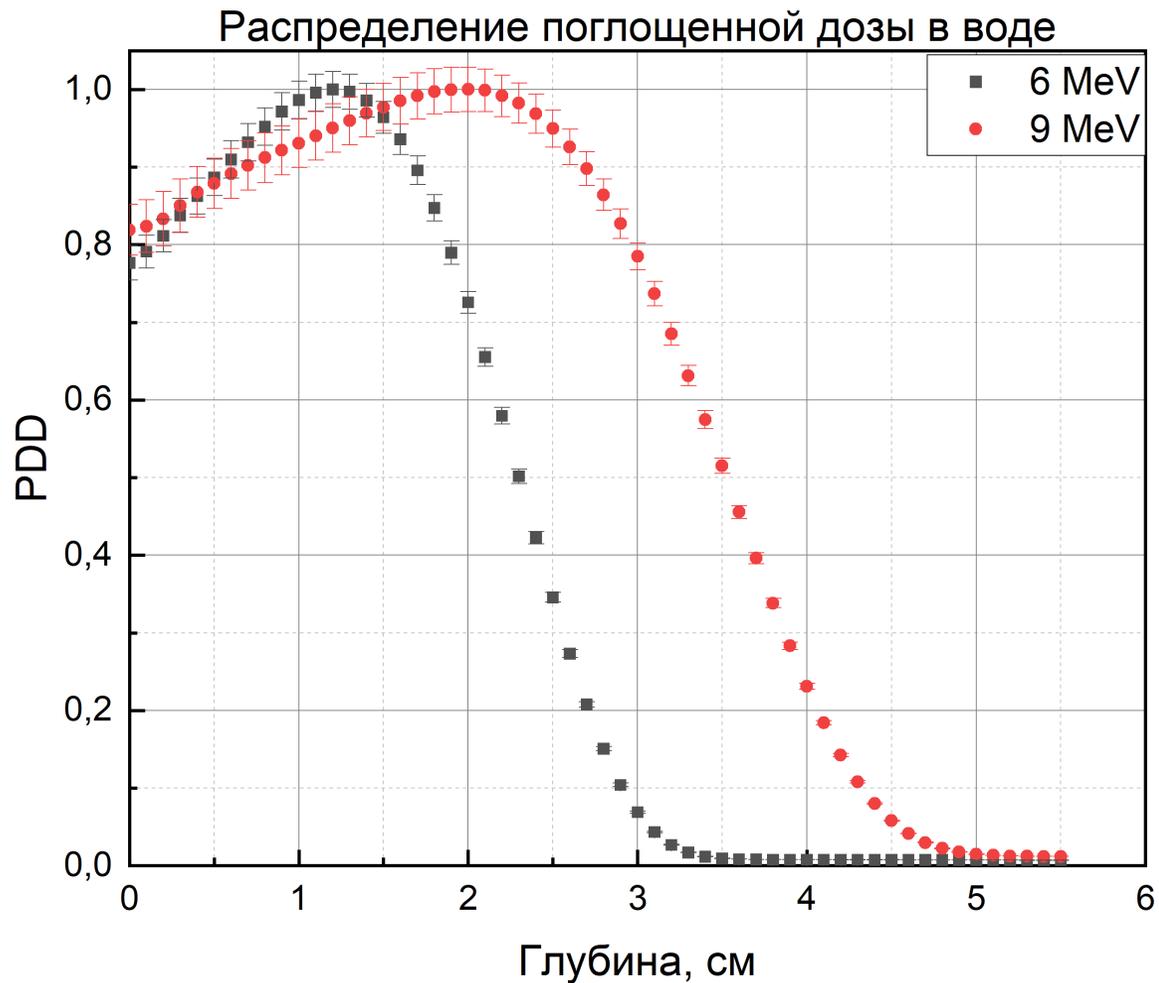
Чувствительный объем:  $0.125 \text{ см}^2$   
Диапазон температур:  $10 - 40 \text{ }^\circ\text{C}$   
Точность измерения: 4% при энергиях больше  
 $140 \text{ кэВ}$   
Временное разрешение: 121 мкс



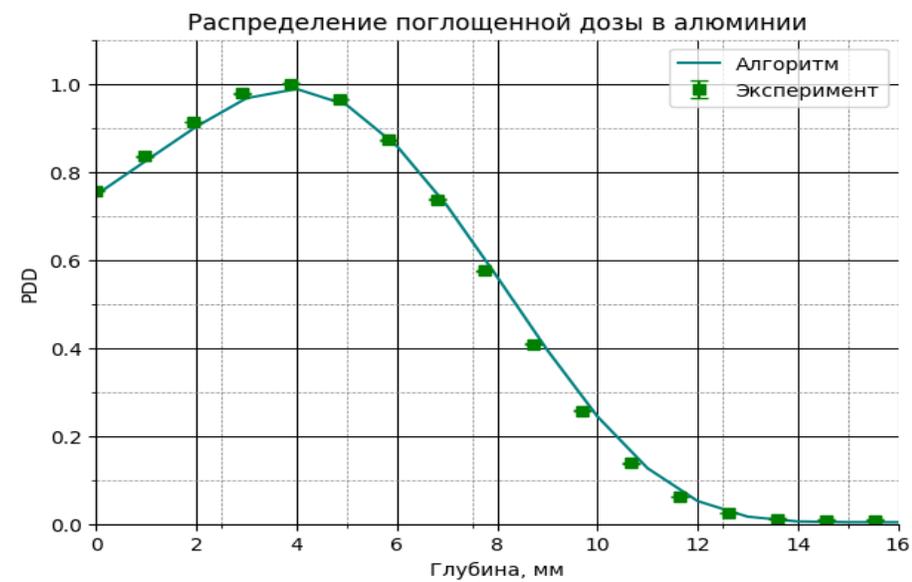
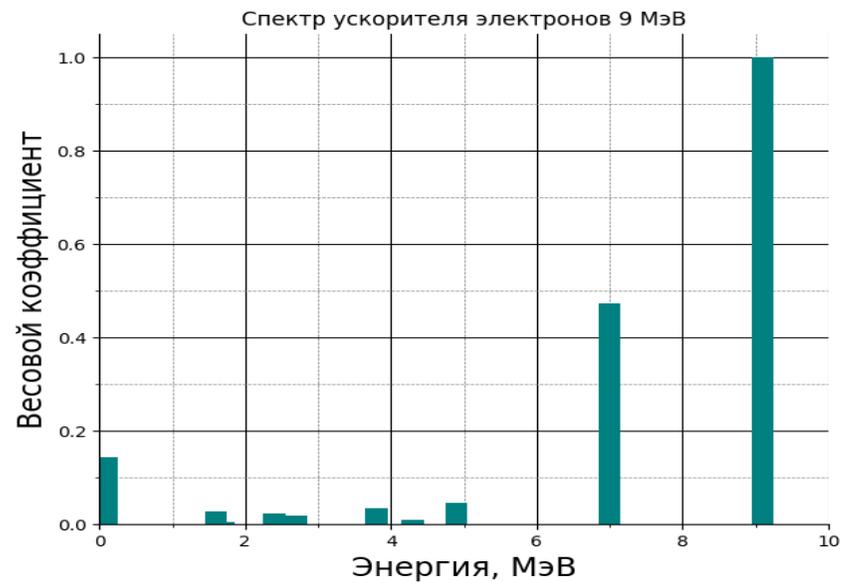
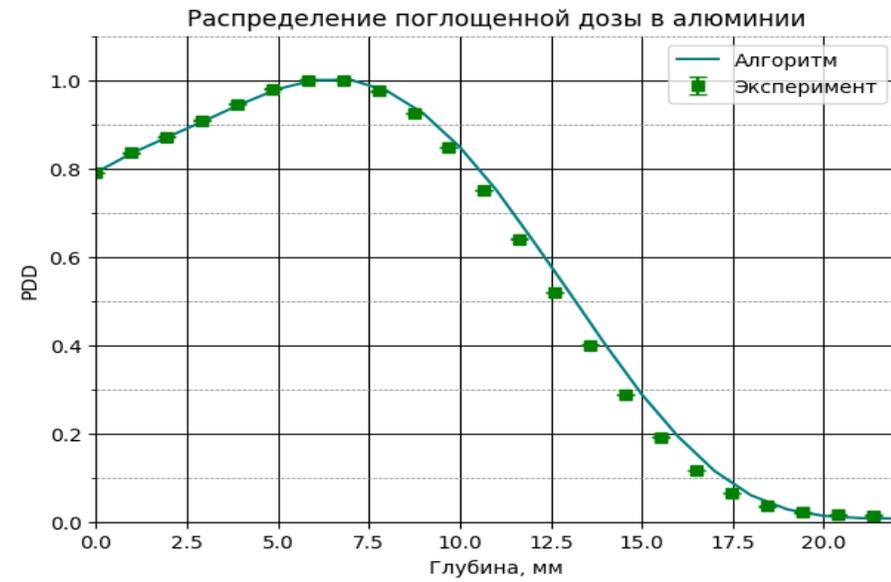
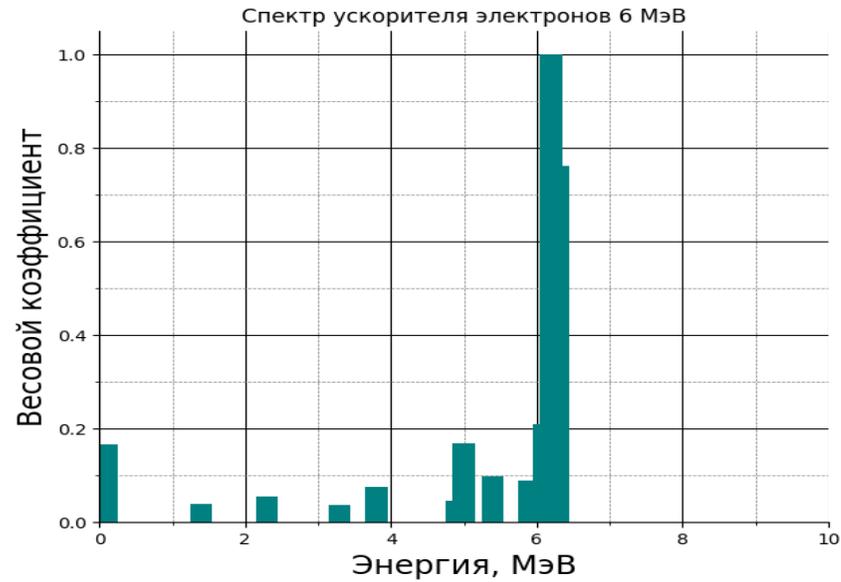
Ионизационная камера  
Roos Chamber (для фантома из твердой воды)

Чувствительный объем:  $0.35 \text{ см}^2$   
Диапазон температур:  $10 - 40 \text{ }^\circ\text{C}$   
Точность измерения: 0.5%  
Временное разрешение: 125 мкс

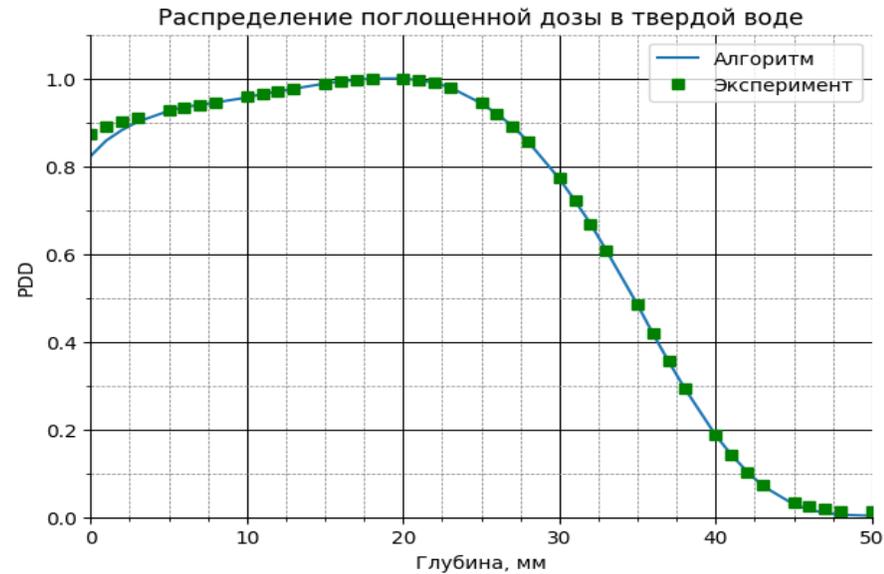
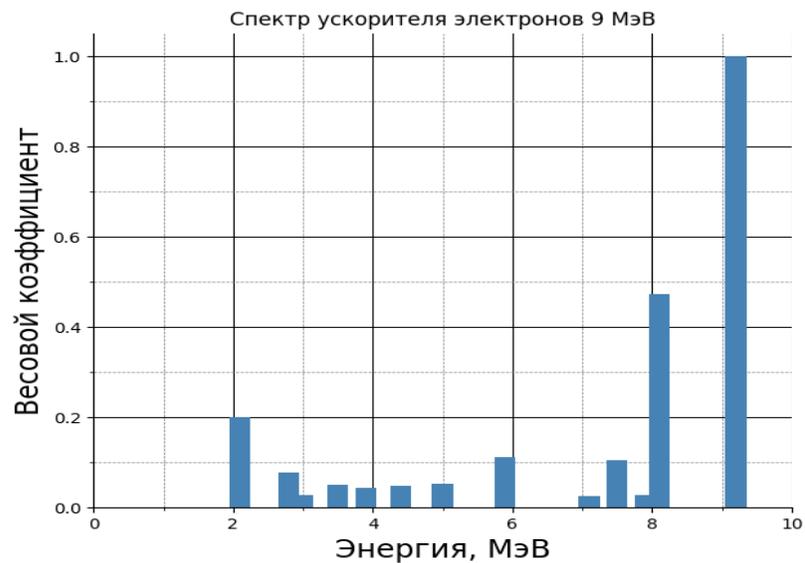
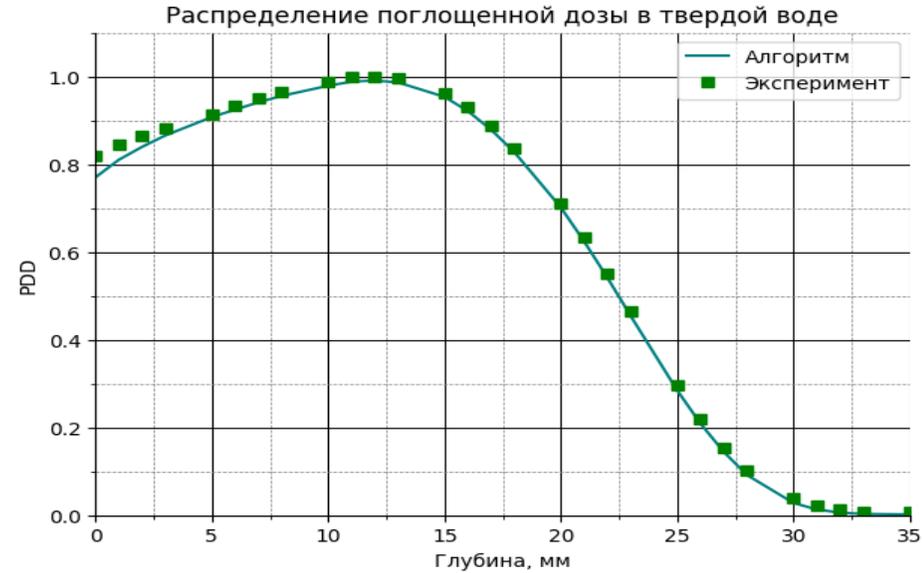
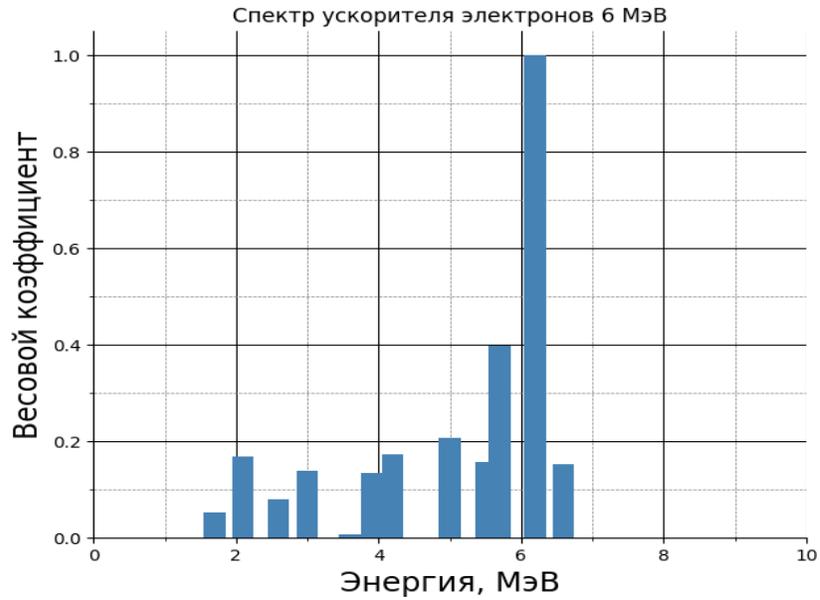
# Результаты эксперимента



# Результат работы алгоритма из алюминия



# Результат работы алгоритма из твердой воды



## Поддержка и апробация работы

- Исследования поддержаны:
  - грантом РФФ «Поиск биохимических маркеров идентификации радиационной обработки объектов органического происхождения» (2022 – 2025)
  - грантом Фонда Содействия Инновациям «Старт-1» (2022-2023)
  - грантом Московской Академии Инноваторов
- Основные результаты исследований доложены на 19 международных и всероссийских конференциях
- По итогам исследований опубликовано 5 печатных работ