



Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
Физический факультет, Кафедра физики ускорителей и радиационной медицины  
НИИЯФ имени Д.В. Скobel'цына, ОЯФММП



Золотов Сергей Александрович

# Методы восстановления энергетического спектра ускоренных электронов для дозиметрического планирования радиационной обработки объектов произвольной формы и химического состава

Специальность 1.3.18

Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Доклад по материалам кандидатской диссертации

Научный руководитель:

д.ф.-м.н., профессор Черняев А.П.

# Технология радиационной обработки ускоренными электронами

Эффект	Доза
Радиационная модификация полимеров (сшивка, прививка, изменение свойств)	<b>50–200 кГр</b>
Стерилизация медицинских изделий	<b>25 кГр</b>
Стерилизация костных имплантов / костного материала	<b>15–35 кГр</b>
Стерилизация / деконтаминация косметики	<b>5–15 кГр</b>
Повышение урожайности растений (радиационная стимуляция)	<b>≈1–100 Гр</b>
Обработка посевного материала (стимуляция семян)	<b>20–100 Гр</b>
Обработка посевного материала (мутационная селекция)	<b>100–400 Гр</b>
Продление сроков годности пищевой продукции	<b>0.05–3 кГр</b>

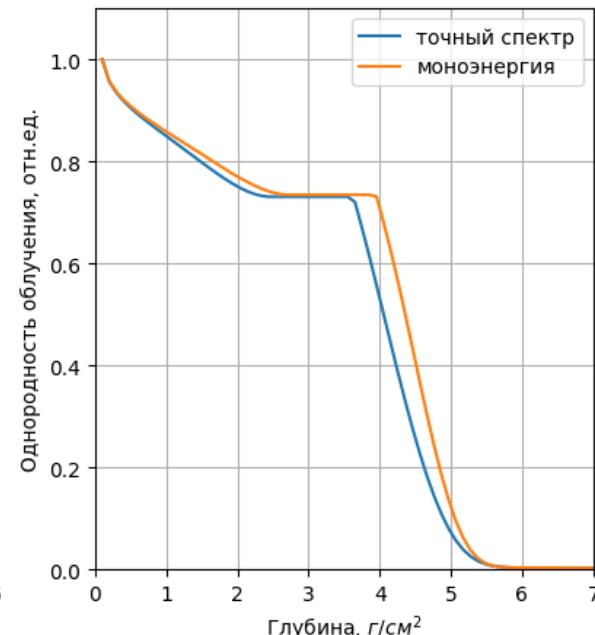
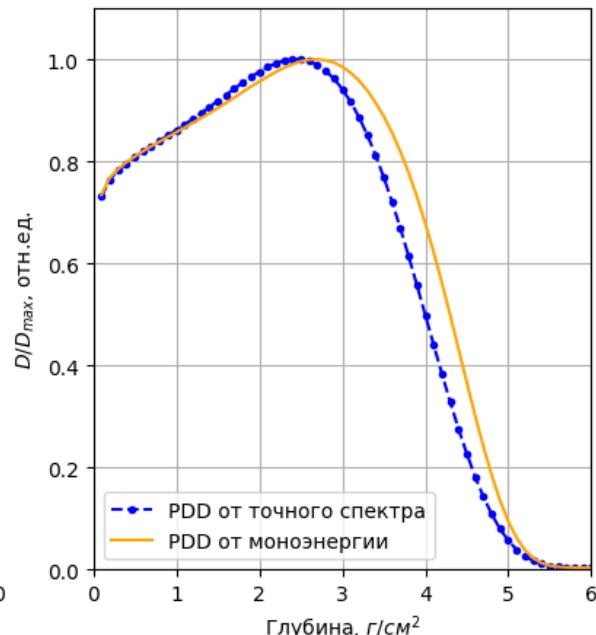
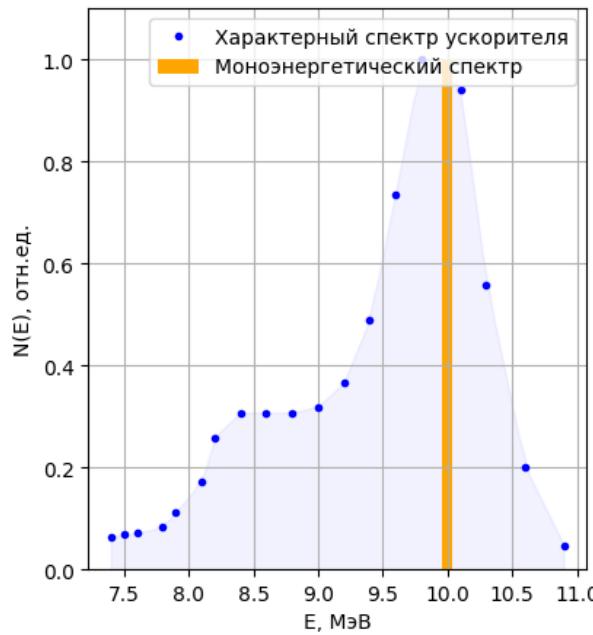


**НЕОБХОДИМО ТЩАТЕЛЬНО ПЛАНИРОВАТЬ ОБЛУЧЕНИЕ**

# Дозиметрическое планирование радиационной обработки



# Влияние энергетического спектра электронов на глубинное распределение поглощенной дозы



(а) сравнение характерного энергетического спектра ускорителя электронов и моноэнергетического спектра; (б) сравнение глубинных дозовых распределений от экспериментально измеренного и моноэнергетического спектров; (в) зависимость однородности обработки от размера облучаемого объекта для экспериментально измеренного и моноэнергетического спектров

# Цель и задачи исследования

**Цель исследования** заключалась в разработке метода восстановления энергетического спектра ускоренных электронов по центрально-осевым глубинным дозовым распределениям, учитывающего ослабление спектра электронов по мере их распространения в воздухе, и его интеграции в методику дозиметрического планирования радиационной обработки объектов произвольной формы и химического состава

**Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:**

1. Построить модель изменения энергетического спектра ускоренных электронов с энергией до 25 МэВ по мере их распространения в воздухе.
2. Разработать метод восстановления энергетического спектра источника электронов с энергией до 25 МэВ по спектру испущенных электронов, прошедших в воздухе путь до 140 см.
3. Разработать метод восстановления энергетического спектра ускоренных электронов с энергией до 25 МэВ по центрально-осевым глубинным дозовым распределениям, учитывающий ослабление спектра электронов по мере их распространения в воздухе.
4. Провести экспериментальную проверку разработанных методов на промышленных и медицинских линейных ускорителях электронов.
5. Интегрировать разработанный метод восстановления энергетического спектра ускоренных электронов в методику дозиметрического планирования радиационной обработки объектов произвольной формы и химического состава.
6. Провести апробацию разработанной методики в условиях центра промышленной радиационной обработки.

# Положения, выносимые на защиту

1. Энергетический спектр ускоренных электронов с энергией до 25 МэВ, прошедших в воздухе путь до 140 см, описывается в виде интегральной свертки исходного спектра электронов с ядром, выражающаяся через распределение Ландау.
2. Уравнение Фредгольма 1-го рода, описывающее ослабление энергетического спектра электронов по мере их распространения в воздухе, допускает устойчивое обращение методом SVD-разложения с фильтрацией сингулярных чисел.
3. Представление энергетического спектра ускоренных электронов в виде суммы основной компоненты, выражающейся через интегральную свертку распределений Ландау и Гаусса, и поправочной компоненты, рассчитываемой методом А.Н. Тихонова, позволяет восстановить его по глубинным дозовым распределениям с шагом 0.1 МэВ и погрешностью не более 5%.
4. Использование восстановленных энергетических спектров ускоренных электронов для расчета распределений поглощенной дозы по объему объектов произвольной формы и химического состава методом Монте-Карло позволяет предсказывать дозовые поля с погрешностью не более 5% и выявлять локальные неоднородности в дозовых распределениях на этапе планирования радиационной обработки.

# Научная новизна

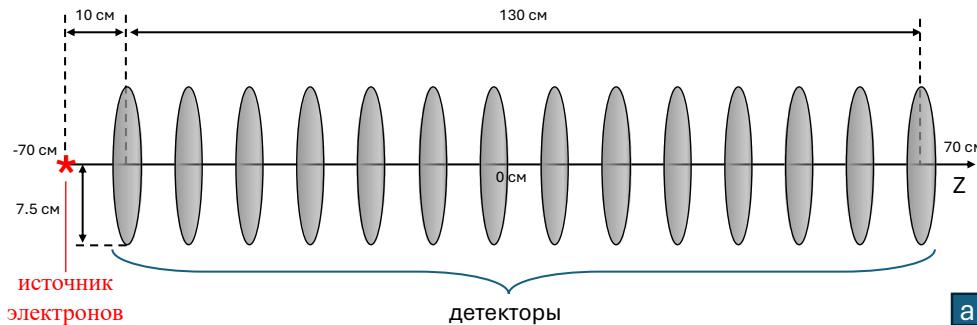
1. Предложена модель, описывающая изменение энергетического спектра ускоренных электронов с энергией до 25 МэВ по мере их распространения в воздухе.
2. Впервые получено устойчивое решение обратной задачи восстановления энергетического спектра источника электронов по спектру испущенных электронов, прошедших в воздухе известный путь.
3. Показано, что восстановление энергетического спектра ускоренных электронов по глубинным дозовым распределениям в виде суммы основной – представляемой в виде интегральной свертки распределения Гаусса с ядром, выражающимся через распределение Ландау – и поправочной, рассчитываемой методом А.Н. Тихонова, компонент, позволяет получить энергетический спектр с ошибкой не более 5%.
4. Сформирована методология дозиметрического планирования радиационной обработки **объектов произвольной формы и химического состава** на радиационно-технических установках на базе ускорителей электронов, **учитывающая ослабление энергетического спектра электронов в воздухе**.

# Практическая значимость

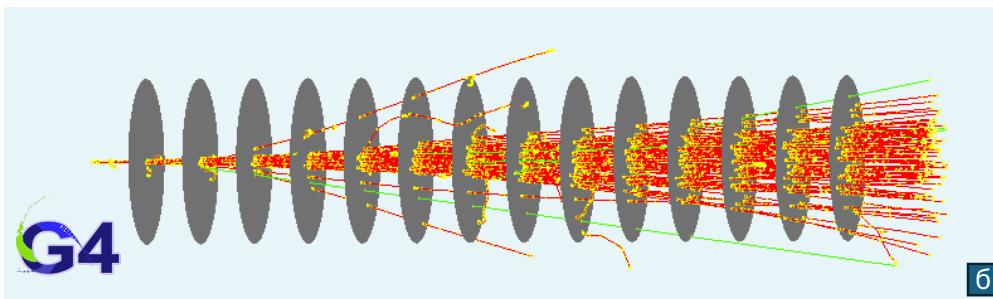
1. Предложенная методика восстановления энергетического спектра ускоренных электронов по глубинным дозовым распределениям формирует расширяет теоретические основы для решения обратных задач дозиметрии электронных пучков и повышает точность расчётов дозовых полей.
2. Разработанный алгоритм восстановления энергетического спектра ускоренных электронов по глубинным дозовым распределениям лёг в основу систем «DosePreview by IRT» и «Туя» для быстрого расчёта распределений поглощенной дозы по объему объектов наиболее распространенных в радиационной обработке форм.
3. Результаты экспериментальных измерений поверхностной дозы на ускорителях УЭЛР-10-15С и Mevex MB 10-30 SC900 легли в основу системы «Demetra by IRT» для расчета оптимальных параметров работы радиационно-технических установок на базе ускорителей электронов, обеспечивающих доставку заданной дозы до обрабатываемого объекта.
4. Полученные результаты используются в учебном процессе на физическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова в курсах «Дозиметрия ионизирующих излучений» и «Компьютерное моделирование ядерно-физического эксперимента с использованием инструментария Geant4», «Ядерно-физические методы в медицине», а также в образовательных программах повышения квалификации специалистов в области радиационной обработки.
5. Разработанная методика дозиметрического планирования была внедрена в промышленную практику в центре радиационной обработки «Axenter» (г. Дубна).

# Материалы и методы

## Компьютерное моделирование распространения электронного пучка в воздухе



а



б

Геометрия моделирования распространения тонкого пучка моноэнергетических электронов в воздухе. Красным отмечены треки электронов. Желтыми точками – взаимодействия излучения с воздухом. Зелеными линиями – треки фотонов.

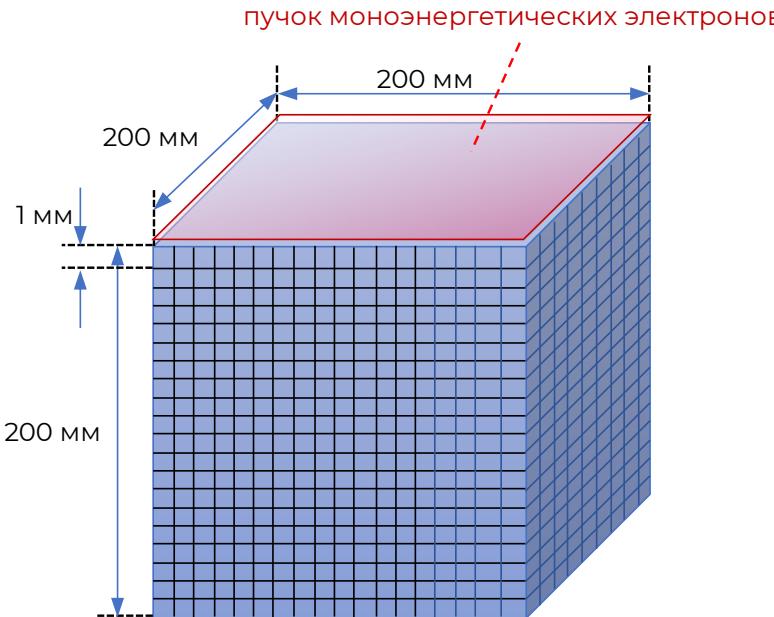
### Основные параметры моделирования:

- Количество первичных событий:  $10^7$
- Энергия первичных электронов: 0.1 - 25 МэВ, шаг 0.1 МэВ;
- Расстояние от источника до детекторов: 10 - 140 см, шаг 10 см;
- PhysicsList: QBBC + Livermore;
- Cut: 0.1 мм;
- Всего проведено 241 моделирование.

Детекторы в виде одинаковых воздушных дисков диаметром 15 см и толщиной 1 мкм располагались вдоль центральной оси пучка каждые 10 см относительно источника. Энергия проходящих через детекторы электронов сохранялась в CERN-ROOT гистограмму.

# Материалы и методы

## Расчет объемных дозовых распределений с использованием Geant4



Геометрия моделирования для расчета распределений поглощенной дозы по объему кубических фантомов  $(20 \times 20 \times 20) \text{ см}^3$  от моноэнергетических электронов.

### Основные параметры моделирований:

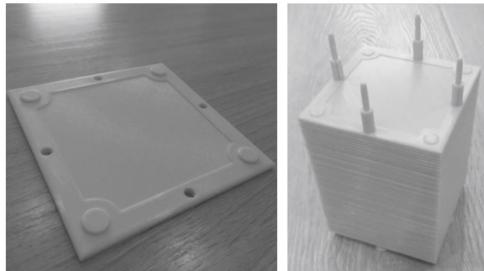
- Размер фантомов:  $(20 \times 20 \times 20) \text{ см}^3$ ;
- Размер voxелов:  $(1 \times 1 \times 1) \text{ мм}^3$ ;
- Материал фантомов: вода, «твердая вода»<sup>1</sup>, PETG-пластик<sup>2</sup>, алюминий;
- Количество первичных событий:  $10^7$ ;
- Энергия первичных электронов: 0.1 - 25 МэВ, шаг 0.01 МэВ для водного фантома; 0.1 - 25 МэВ, шаг 0.1 МэВ для оставшихся;
- PhysicsList: QBBC + Livermore;
- Cut: 0.1 мм;
- Всего проведено 2491 моделирование.

<sup>1</sup> «твердая вода»: 97.9%  $(\text{C}_8\text{H}_8)_n$ , 2.1%  $\text{TiO}_2$ . Плотность 1.045 г/см<sup>3</sup>

<sup>2</sup> PETG: полиэтилентерефталат-гликоль  $(\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4)_n$ . Плотность 1.4 г/см<sup>3</sup>

# Материалы и методы

## Измерение глубинных дозовых распределений на ускорителе электронов УЭЛР-10-15С



Сборный фантом из 23 пластин из PETG-пластика толщиной 2.5 мм

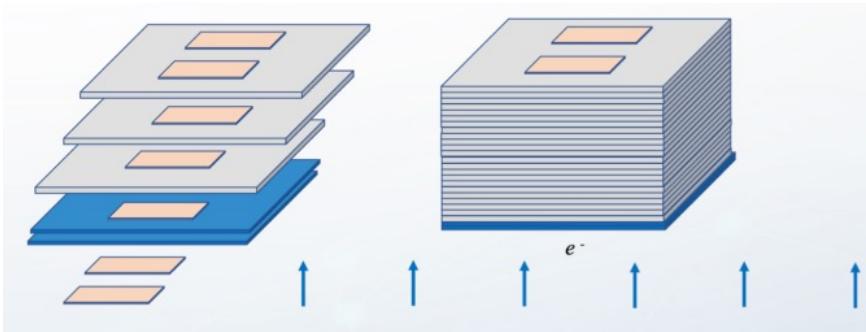


Схема облучения сборных фантомов на ускорителе электронов УЭЛР-10-15С.

### Основная информация об эксперименте:

- Линейный импульсный ускоритель электронов УЭЛР-10-15С, энергия пучка 9.5 МэВ (центр «Теклеор», г. Обнинск);
- Сборный фантом: 23 пластины толщиной 2.5 мм с пазами для закрепления пленочных дозиметров, изготовленный по технологии 3D-печати из PETG-пластика;
- Дозиметрические пленки государственного стандартного образца СО ПД(Э)-1/10, СО ПД(Ф)Э-5/50;
- Спектрофотометр ПЭ-5400ВИ.

# Материалы и методы

## Измерение глубинных дозовых распределений на ускорителе электронов Varian TrueBeam

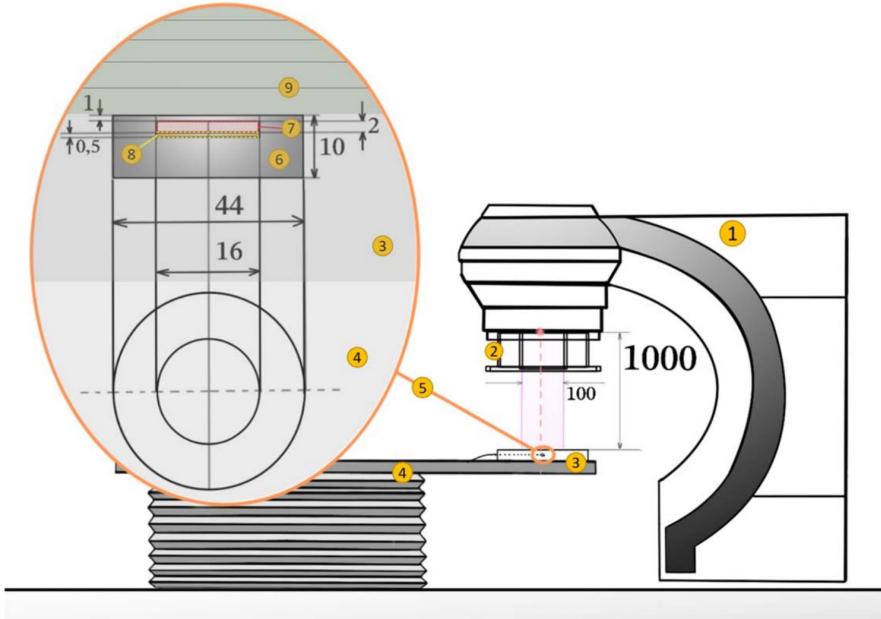
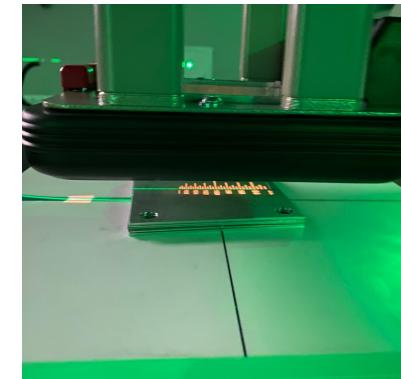


Схема измерения глубинных дозовых распределений на медицинском ускорителе электронов *Varian TrueBeam*. 1 – медицинский ускоритель электронов *Varian TrueBeam*; 2 – коллиматор; 3 – пластина «твёрдой воды» с пазом для ионизационной камеры; 4 – стол с регулируемой высотой; 5 – ионизационная камера; 6 – корпус ионизационной камеры; 7 – чувствительный объём ионизационной камеры; 8 – медный электрод; 9 – фантом (пластины из «твёрдой воды» или алюминия).

### Основная информация об эксперименте:

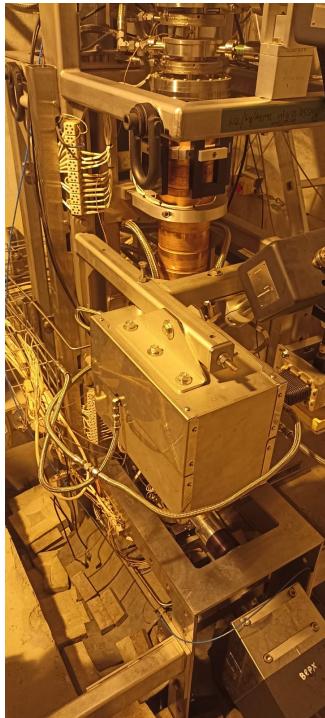
- Ускоритель электронов *VarianTrueBeam*, энергия пучка 6 МэВ, 9 МэВ (НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н.Н. Бурденко, г. Москва);
- Фантом «твёрдая вода» PTW RW3 Slab Phantom;
- Составной фантом из 40 алюминиевых пластин толщиной 0.93 мм;
- Ионизационная камера PTW Roos Chamber P34001;
- Измерения по протоколу МАГАТЭ TRS-398.



Расположение фантомов из «твёрдой воды» и алюминия относительно выхода пучка.

# Материалы и методы

Измерение глубинных дозовых распределений на ускорителе электронов Mevex MB 10-30 SC900



Линейный импульсный  
ускоритель электронов  
Mevex MB 10-30 SC900

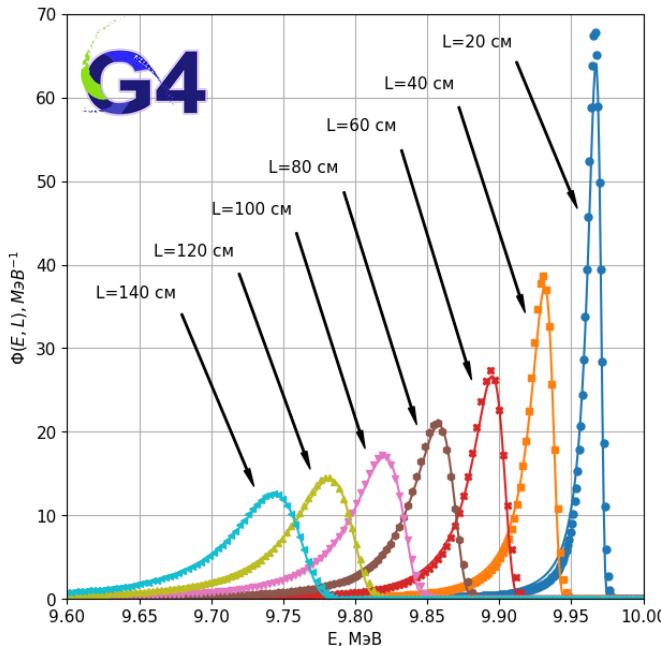


Система развертки пучка ускорителя  
и конвейерная лента.

## Основная информация об эксперименте:

- Линейный импульсный ускоритель электронов Mevex MB 10-30 SC900, энергия пучка 10 МэВ (центр «Axenter», г. Дубна);
- Алюминиевый дозиметрический клин для измерения глубинного дозового распределения;
- Дозиметрические пленки государственного стандартного образца СО ПД(Э)-1/10, СО ПД(Ф)Э-5/50;
- Спектрофотометр ПЭ-5400УФ.

# Изменение энергетического спектра пучка электронов по мере его распространения в воздухе



Энергетические спектры  $\Phi(E, L)$  электронов с начальной энергией 10 МэВ, прошедших в воздухе путь до 140 см (расчет, инструментарий Geant4).

Полученные в компьютерном моделировании данные аппроксимировались с помощью модифицированного распределения Ландау:

$$\Lambda(E) = \lambda \left( \frac{E_0 - E - a}{b} \right)$$

Здесь:

$E_0$  – начальная энергия электронов;

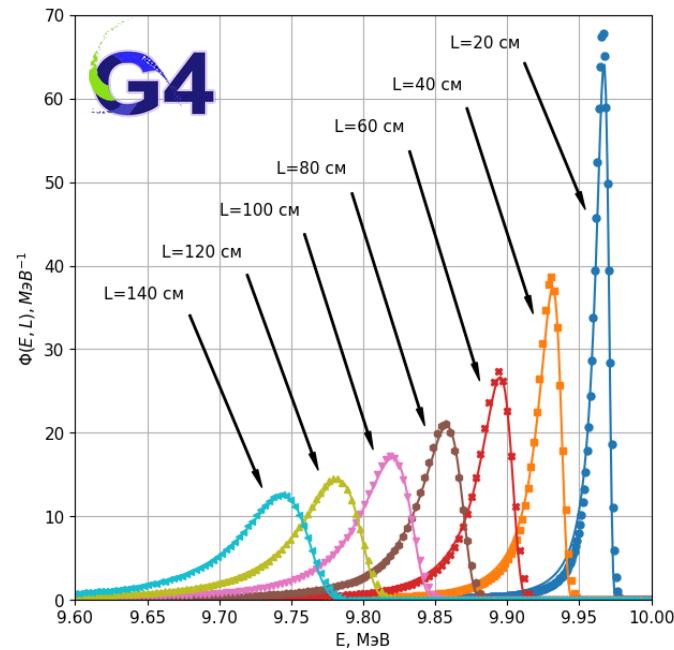
$a$  – параметр сдвига;

$b$  – параметр масштаба;

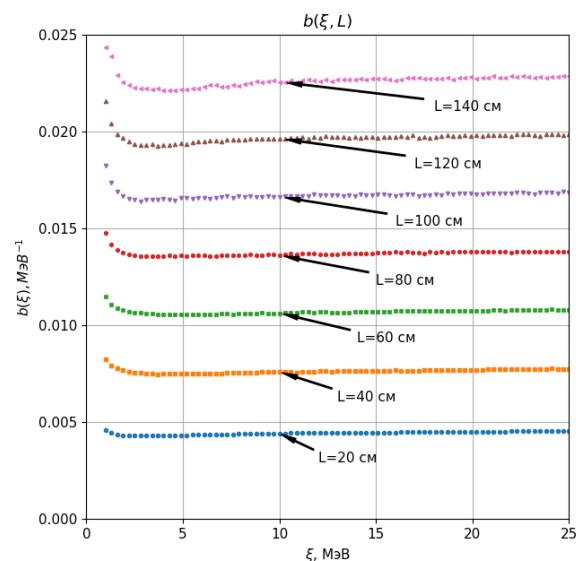
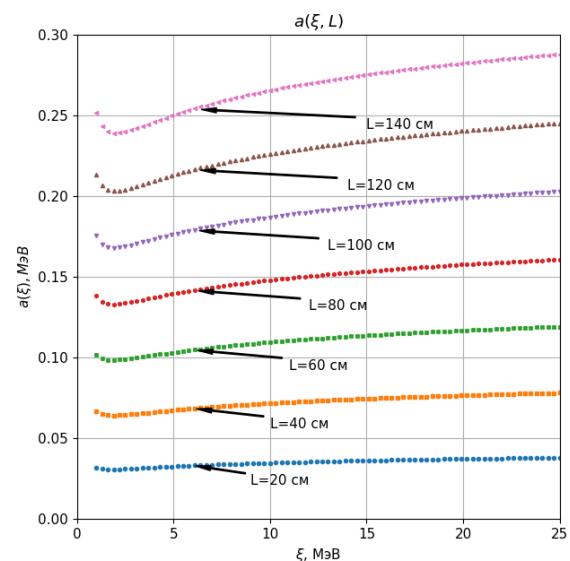
$\lambda(x)$  - классическое распределение Ландау:

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

# Изменение энергетического спектра пучка электронов по мере его распространения в воздухе



Энергетические спектры  $\Phi(E, L)$  электронов с начальной энергией 10 МэВ, прошедших в воздухе путь до 140 см (расчет, инструментарий Geant4).



Зависимость параметров сдвига  $a(\xi, L)$  и масштаба  $b(\xi, L)$  в распределении Ландау при описании энергетического спектра пучка электронов, прошедших в воздухе путь до 140 см, от начальной энергии электронов при фиксированных  $L = 20 - 140$  см с шагом 20 см.

# Изменение энергетического спектра пучка электронов по мере его распространения в воздухе

Спектр пучка электронов  $\Phi(E)$ , прошедших в воздухе путь  $L$ , связан с начальным спектром электронов  $\Phi_0(E)$  следующим соотношением:

$$\Phi(E, L) = \Lambda(L) [\Phi_0(E)] = \int_0^{E_{\max}} \Phi_0(\xi) \lambda\left(\frac{\xi - E - a(\xi, L)}{b(\xi, L)}\right) d\xi, \quad (1)$$

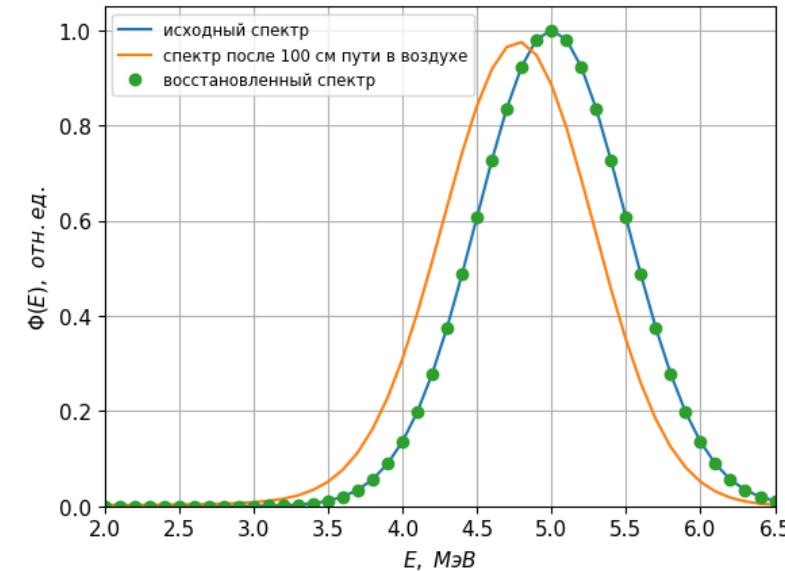
где  $a(\xi, L)$ ,  $b(\xi, L)$  – параметры сдвига и масштаба,  $\lambda(x)$  – распределение Ландау.

$$\Lambda^{ij}(L) = \lambda \frac{\xi^i - E^j - a(\xi^i, L)}{b(\xi^i, L)} \quad (2)$$

$$\Lambda = U \Sigma V^T \quad (3)$$

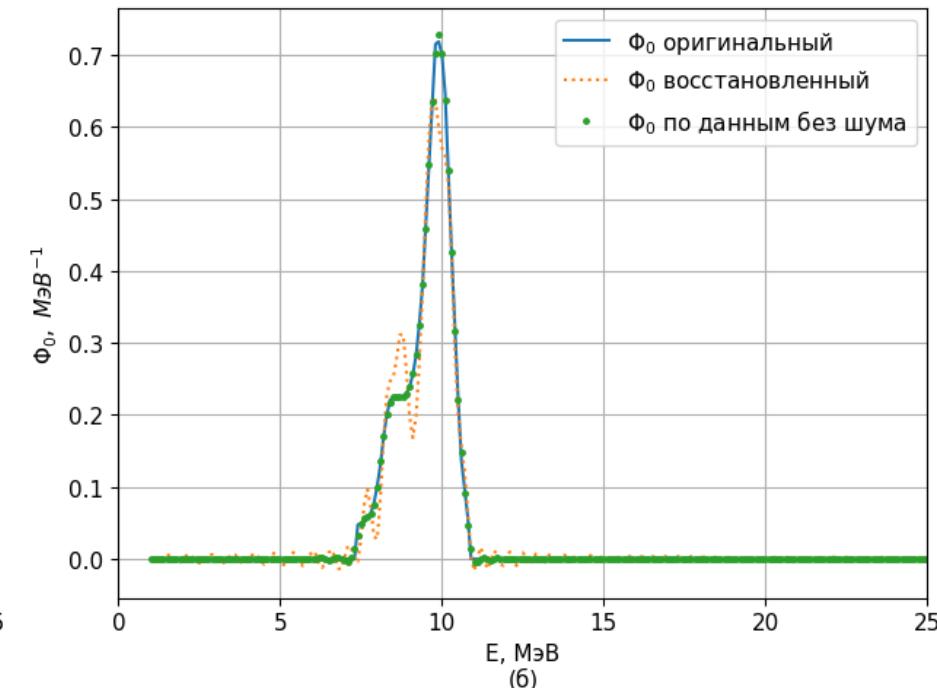
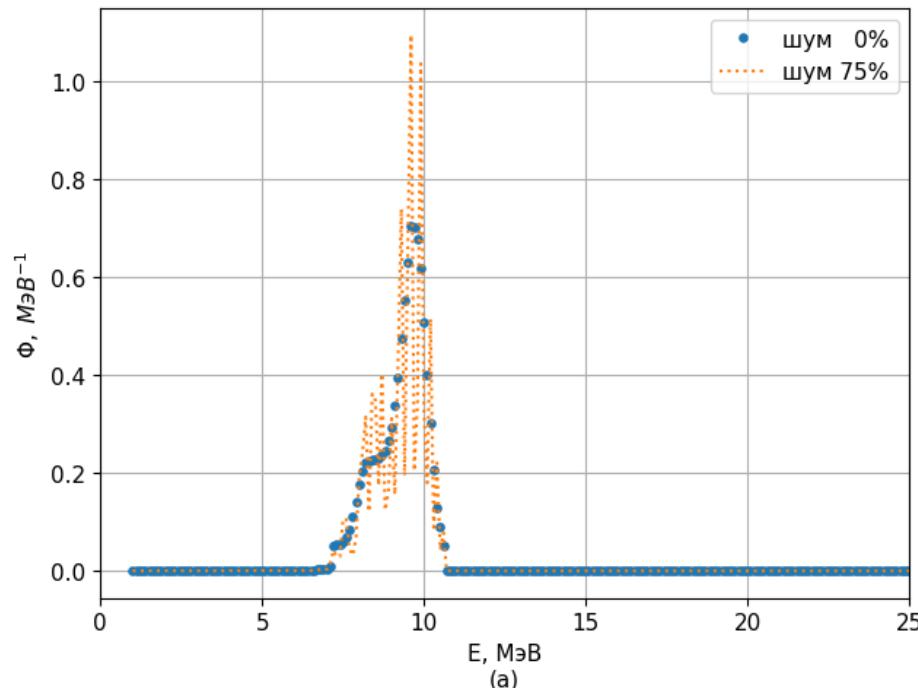
$$\Lambda^+ = V \Sigma^+ U^T \quad (4)$$

$$\Phi_0 = \Lambda^+ \Phi, \quad (5)$$



Восстановление энергетического спектра источника электронов  $\Phi_0(E)$  по спектру электронов  $\Phi(E, L)$ , прошедших в воздухе путь 100 см. Синяя кривая – исходный спектр  $\Phi_0(E)$ , оранжевая кривая спектр  $\Phi(E, L)$ , зелёные точки – восстановленный методом Ю.П. Пытьева спектр  $\Phi_0(E)$  по спектру  $\Phi(E, L)$ .

# Обращение оператора ослабления спектра методом редукции Ю.П. Пытьева



(а) энергетический спектр электронов, прошедших в воздухе путь  $L=100$  см: без шума (точки) и с искусственно внесенным 75%-шумом (пунктир); (б) исходный (линия) и восстановленные по зашумленным (пунктир) и чистым (точки) данным спектры

# Трехэтапный метод восстановления энергетического спектра ускорителя по глубинным дозовым распределениям

Предлагается искать спектр электронов у поверхности фантома в виде суммы основной и поправочных компонент:  $\Phi(E) = \Phi_\lambda + \delta\Phi$ .

Спектру  $\Phi_\lambda$  соответствует доза  $D_\lambda(x)$ , спектру  $\delta\Phi$  соответствует доза  $\delta D(x)$ .

**На первом этапе** находится **основная компонента** спектра:

$$\Phi_\lambda(E, \mu, \sigma) = \int_0^{E_{max}} \exp\left(-\frac{(\xi-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \lambda\left(\frac{\xi-E-\alpha(\xi, L)}{b(\xi, L)}\right) d\xi$$

$$\mu, \sigma = \arg \min_{\mu', \sigma'} \left\| D_\lambda(x) - \int \Phi_\lambda(E, \mu', \sigma') D_0(E, x) dE \right\|^2$$

**На втором этапе** находится **поправочная компонента** спектра:

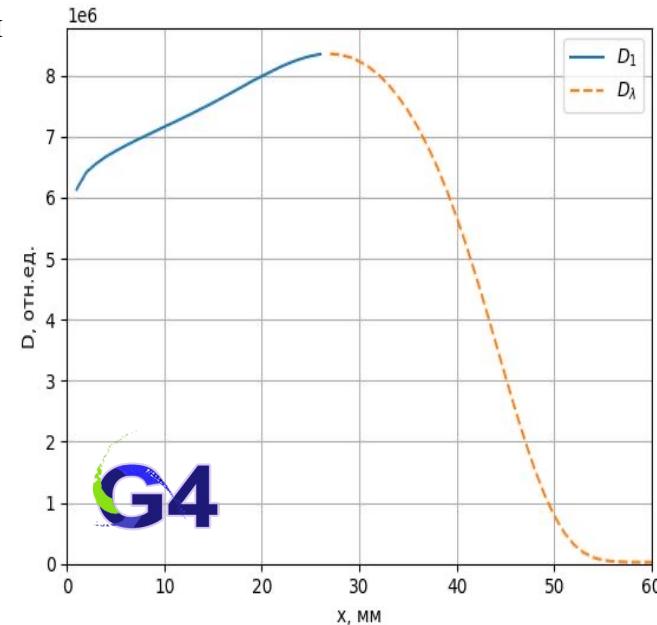
$$D_{res}(x) = D(x) - D_\lambda^*(x)$$

$$D_\lambda^*(x) = \int \Phi_\lambda(E, \mu^*, \sigma^*) D_0(E, x) dE$$

$$\delta\Phi = \arg \min_{\delta\Phi'} \left\{ \left\| D_{res}(x) - \int \delta\Phi' D_0(E, x) dE \right\|^2 + \alpha^2 \|\delta\Phi'\|^2 \right\}$$

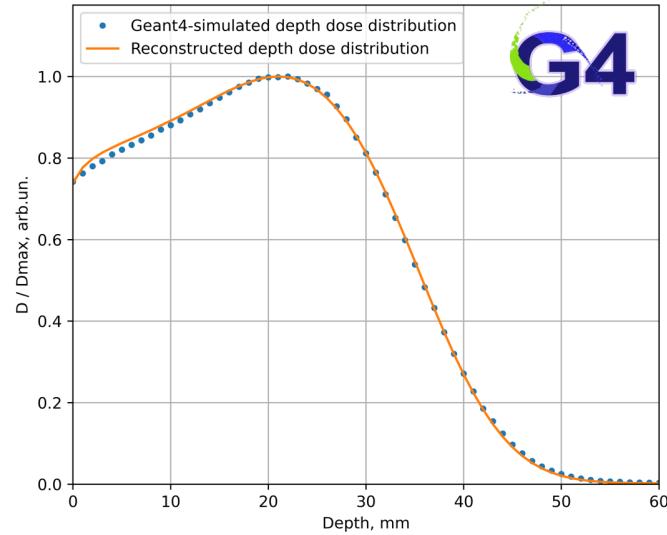
**На третьем этапе** по спектру у поверхности фантома восстанавливается энергетический спектр ускорителя:

$$\Phi_0 = \Lambda^+ \Phi_\lambda + \Lambda^+ \delta\Phi$$

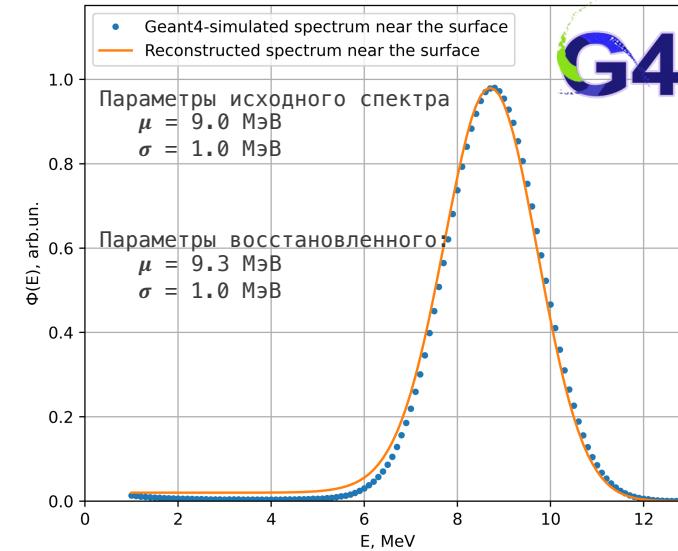


Глубинное (расчет) дозовое инструментарий распределение от monoэнергетических электронов в воде, разбитое на  $D_1(x)$  (синяя кривая) и  $D_\lambda(x)$  (оранжевая штрихованная линия).

# Восстановление энергетического спектра электронов у поверхности фантома по глубинному дозовому распределению в воде, рассчитанному методом компьютерного моделирования

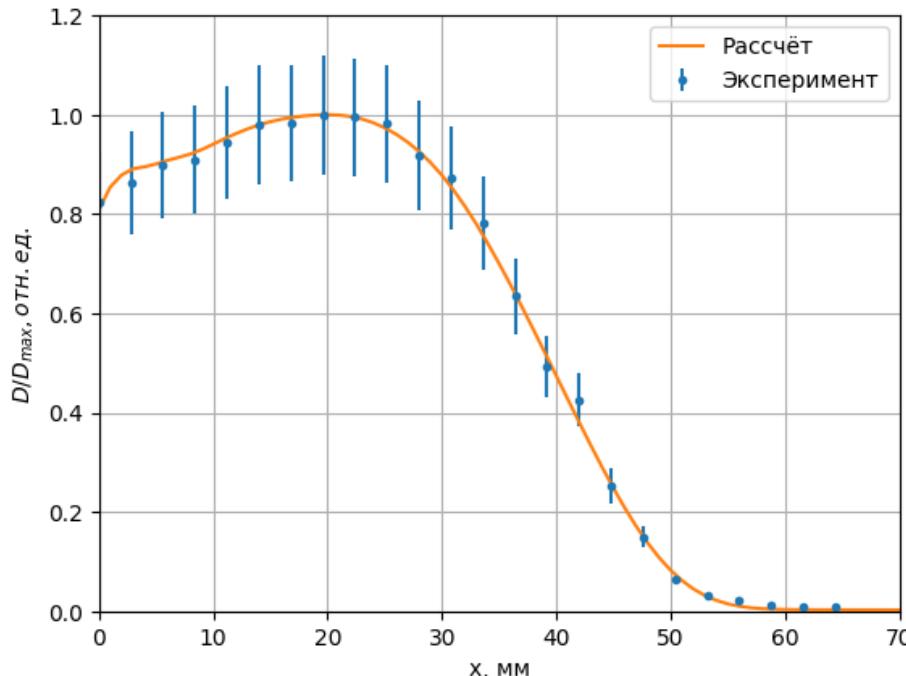


Глубинное дозовое распределение в воде (расчет, инструментарий Geant4), создаваемое электронами с энергетическим спектром, подчиняющимся распределению Гаусса с параметрами  $\mu=9.0$  МэВ,  $\sigma=1.0$  МэВ (синие точки) и аналитически рассчитанное глубинное дозовое распределение от восстановленного спектра (оранжевая кривая)

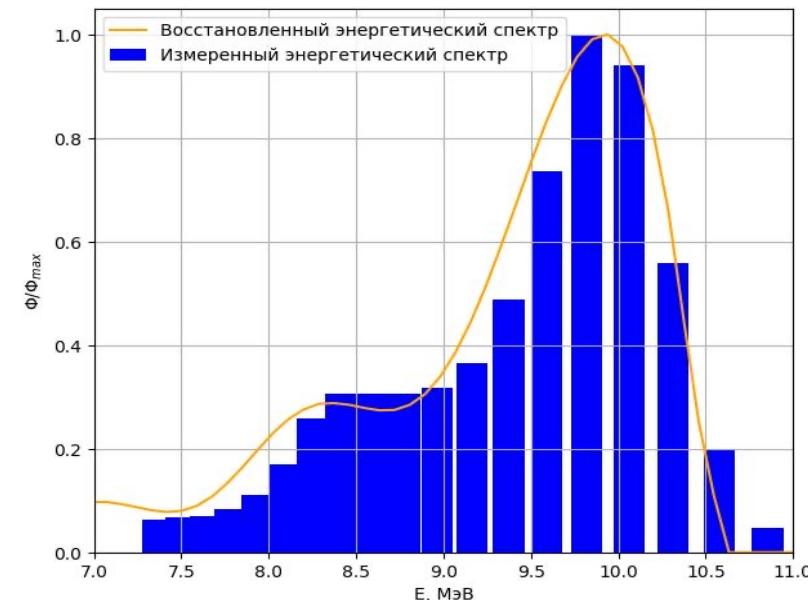


Энергетический спектр электронов, заданный в моделировании Geant4 (синие точки) и энергетический спектр электронов, восстановленный по глубинному дозовому распределению в воде (оранжевая кривая)

# Восстановление энергетического спектра пучка ускорителя электронов УЭЛР-10-15-С по экспериментально измеренным глубинным дозовым распределениям

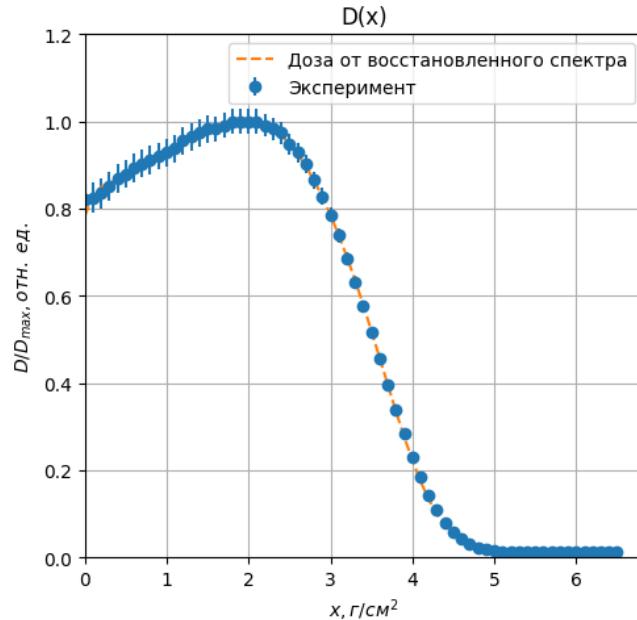


Глубинные дозовые распределения в PETG-пластике, экспериментально измеренные на ускорителе УЭЛР-10-15-С, работающем в режиме 10 МэВ.

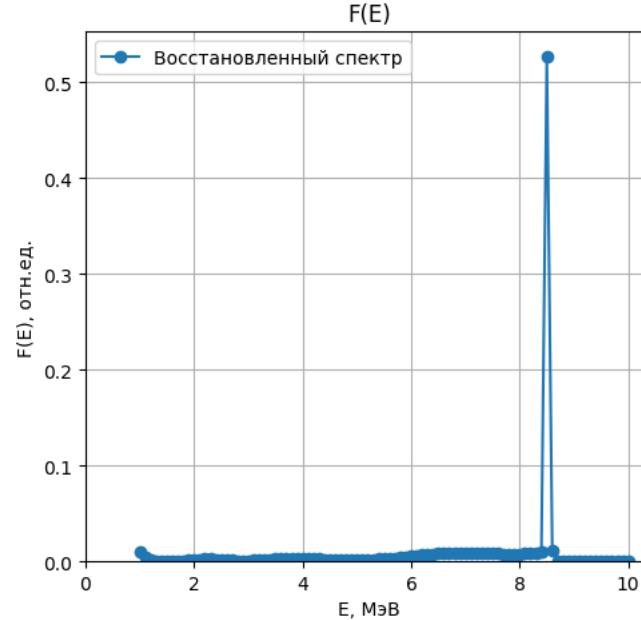


Энергетический спектр ускорителя электронов УЭЛР-10-15-С, измеренный экспериментально<sup>1</sup> (синие столбцы) и восстановленный по экспериментально измеренным глубинным дозовым распределениям в PETG-пластике (оранжевая кривая).

# Восстановление энергетического спектра ускорителя Varian TrueBeam



Экспериментально измеренное аналитически рассчитанное глубинное дозовое распределение в «твердой воде» для ускорителя Varian TrueBeam с эффективной энергией электронов 9 МэВ.

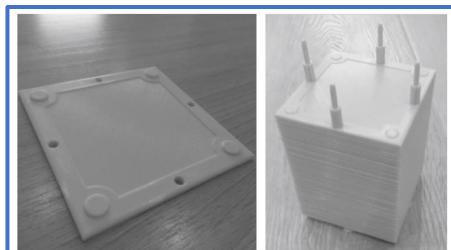


Энергетический спектр ускоренных электронов, восстановленный по экспериментально измеренному глубинному дозовому распределению в «твердой воде» для ускорителя Varian TrueBeam с эффективной энергией электронов 9 МэВ.

## Параметры основной компоненты восстановленного энергетического спектра ускорителя Varian TrueBeam

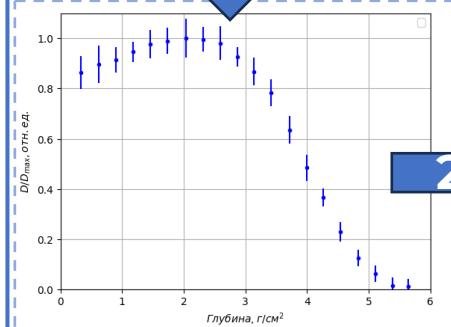
<b>Режим работы ускорителя</b>	$\mu$ , МэВ		$\sigma$ , МэВ	
	тв. вода	Al	тв. вода	Al
6 МэВ	5,95	5,85	0,03	0,02
9 МэВ	8,68	8,65	0,03	0,03

# Процесс планирования Р/О



Измерение глубинного распределения поглощенной дозы в опорном веществе

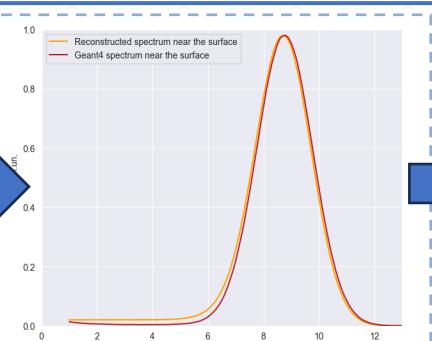
1



Глубинное дозовое распределение, экспериментально измеренное на ускорителе УЭЛР-10-15-С-60, работающего в режиме 10 МэВ

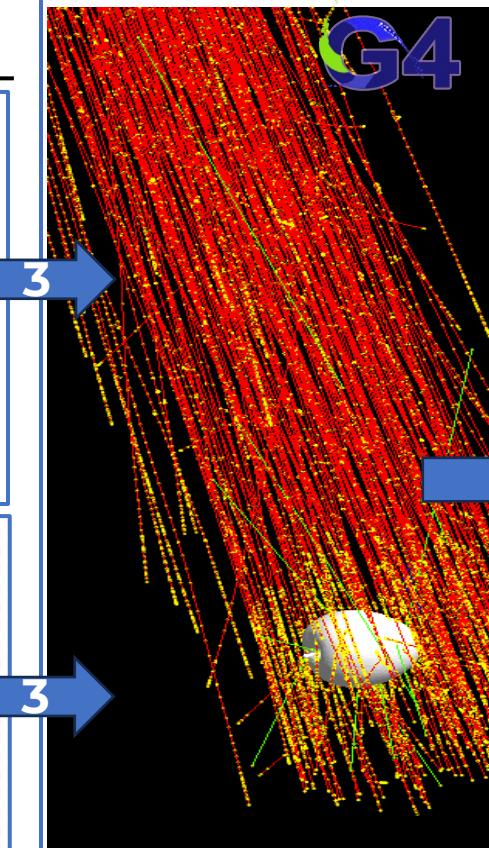


2

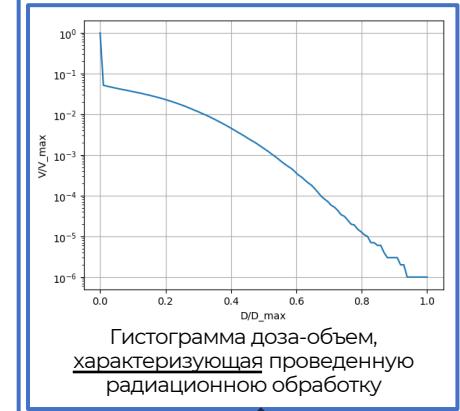


Восстановление энергетического спектра пучка по измеренному глубинному дозовому распределению

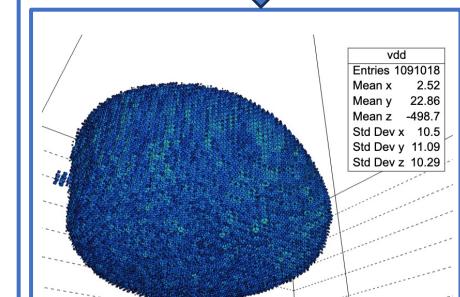
3



3



4



Трехмерная карта дозового распределения в обрабатываемом объекте

# “DosePreview”: быстрый расчет объемных дозовых распределений от электронного пучка с известным энергетическим спектром



## Thuja

### ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

HIGH-TECH SIMULATION UI

Форма объекта:  
-- Выберите --

Материал:  
-- Выберите материал --

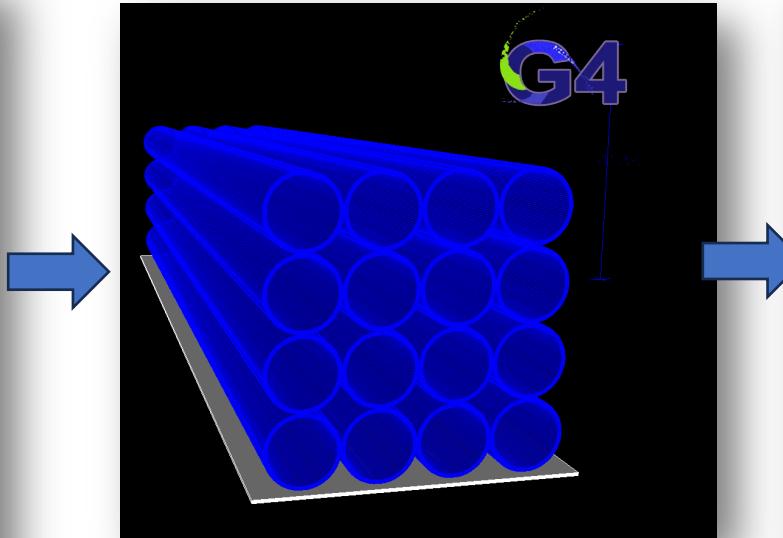
Масса / Плотность:  
Масса Г Плотность (г/см<sup>3</sup>)

Загрузить спектр Загрузить распределение

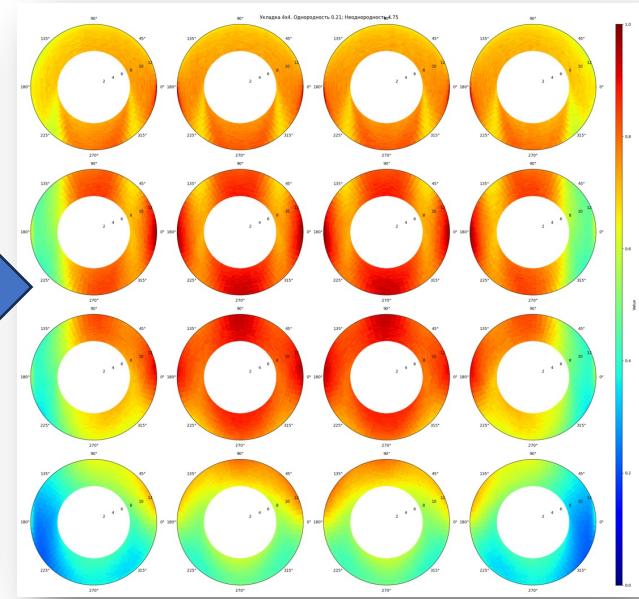
Запустить моделирование

# «Туя»: автоматический расчет трехмерных дозовых распределений по объему полых цилиндрических фантомов

Rows Number	4
Inner Radius (mm)	31.5
Outer Radius (mm)	35
Mass (kg)	32
Length (cm)	135
Beam Energy (MeV)	10
Beam Scanning Width (mm)	60
<b>Apply Irradiation Scheme</b>	



Пользовательский интерфейс системы планирования «Туя»



Визуализация схемы облучения, созданной в Geant4-моделировании, автоматически созданной по параметрам, введенным пользователем в графический интерфейс системы планирования «Туя»

Распределение поглощенной дозы (расчет, инструментарий Geant4) по объему термоусаживаемых изделий в укладке 4x4.

# «Туя»: автоматический расчет трехмерных дозовых распределений по объему полых цилиндрических фантомов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025691280

Система планирования промышленной радиационной обработки "Туя"

Правообладатель: Золотов Сергей Александрович (RU)

Авторы: Золотов Сергей Александрович (RU), Близнюк Ульяна Александровна (RU), Борщевская Полина Юрьевна (RU), Никитченко Александр Денисович (RU), Родин Игорь Александрович (RU), Студеникин Феликс Рикардович (RU), Черняев Александр Петрович (RU)

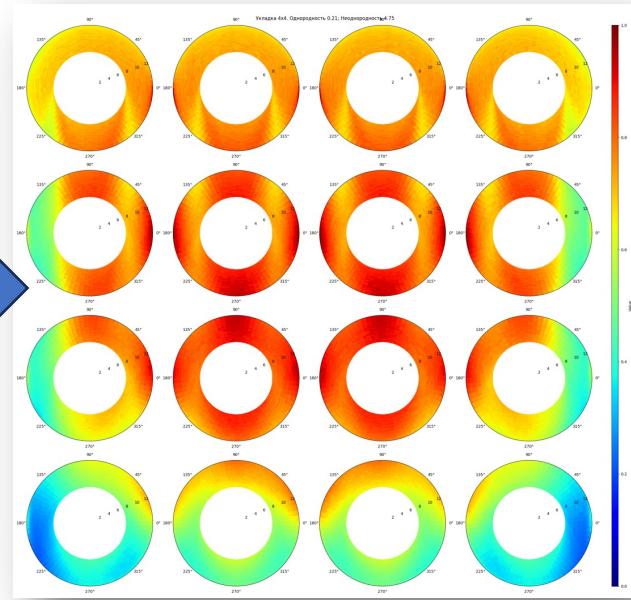
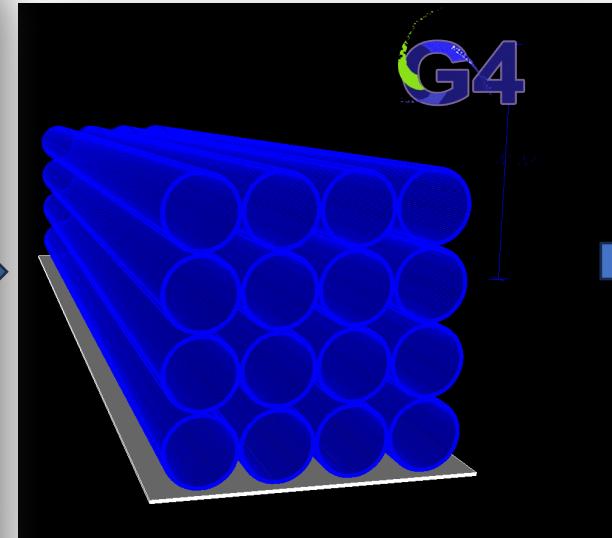
Заявка № 2025690605

Дата поступления 06 ноября 2025 г.

Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ 13 ноября 2025 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности  
документ подписан  
Сертификат 00557947-4131-1313-6881-759556  
документ подписан  
достоверен по 28.11.2025

Ю.С. Зубов



Визуализация схемы облучения, созданной в Geant4-моделировании, автоматически созданной по параметрам, введенным пользователем в графический интерфейс системы планирования «Туя»

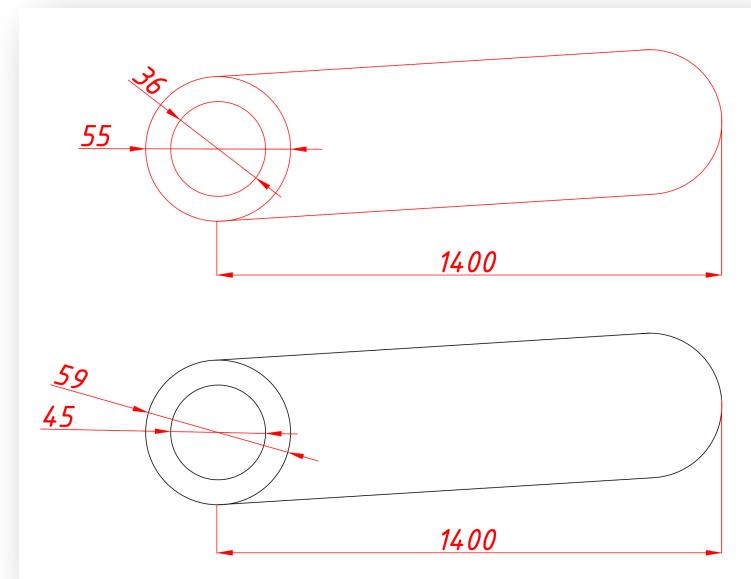
Распределение поглощенной дозы (расчет, инструментарий Geant4) по объему термоусаживаемых изделий в укладке 4x4.

# Верификация системы «Туя»

Размещение дозиметрических пленок в эксперименте

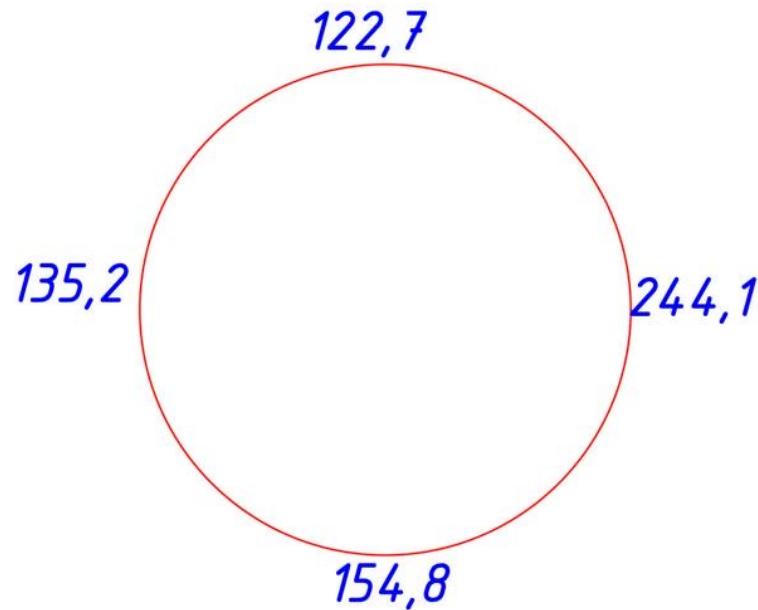


Схема эксперимента по облучению термоусаживающихся трубок.

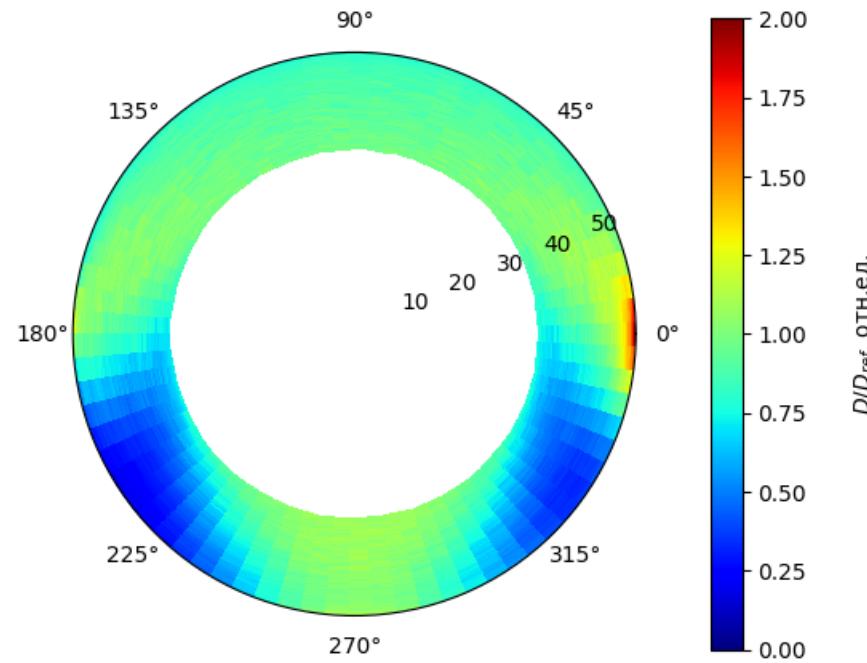


Геометрические параметры обрабатываемых термоусаживающихся трубок

# Верификация системы «Туя». Эксперимент с красными трубками

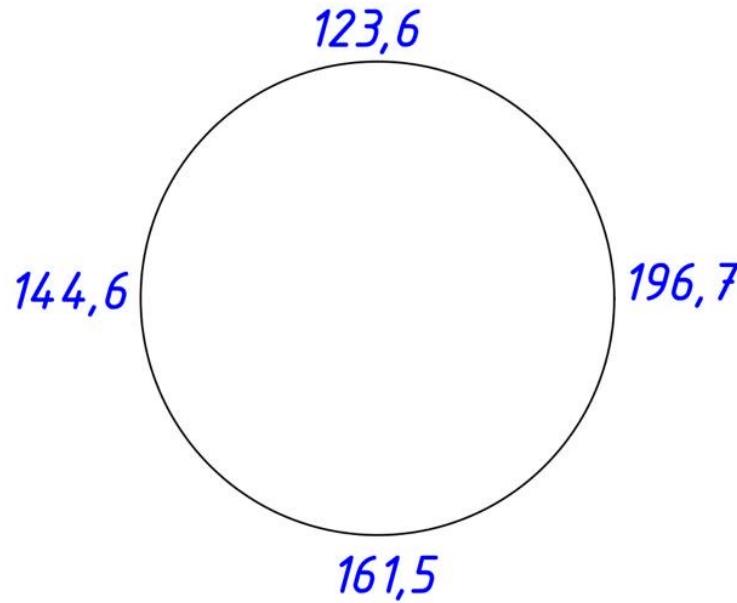


Измеренные значения  
поглощенной дозы в  
контрольных точках.

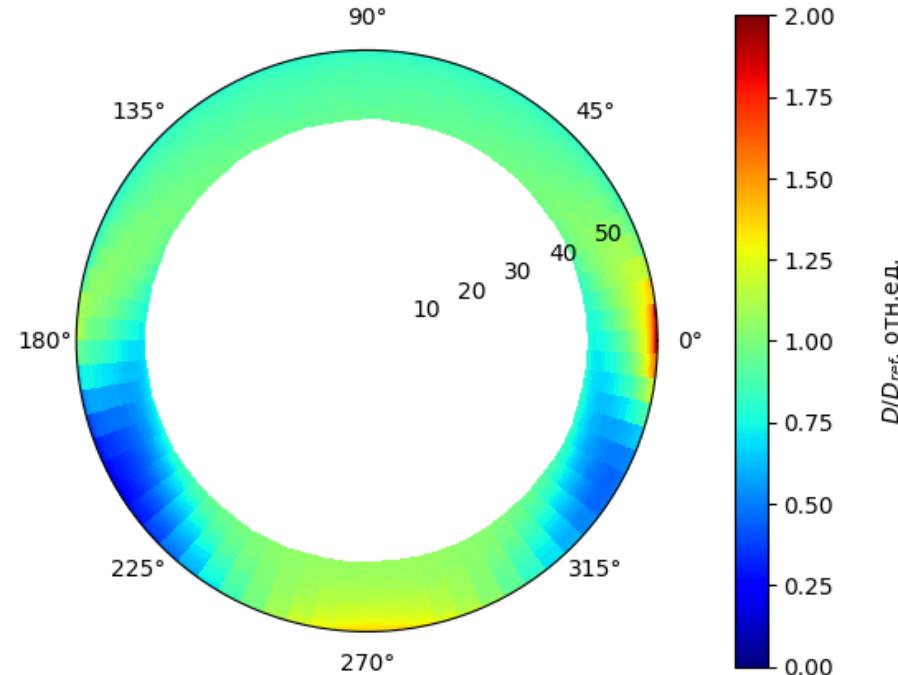


Распределение поглощенной дозы  
по объему термоусаживающегося  
изделия. «Туя» + Geant4

# Верификация системы «Туя». Эксперимент с черными трубками



Измеренные значения  
поглощенной дозы в  
контрольных точках.



Распределение поглощенной дозы  
по объему термоусаживающегося  
изделия. «Туя» + Geant4

# Расчет параметров РТУ для доставки объекту заданной дозы

Demetra by Industrial Radiation Technologies

Length (cm)	<input type="text"/>
Width (cm)	<input type="text"/>
Mass (kg)	<input type="text"/>
Dose (Gy)	<input type="text"/>

Irradiation sides	<input type="text"/>
Sweep (cm)	<input type="text"/>
Beam Energy (MeV)	<input type="text"/>
Beam Current (mA)	<input type="text"/>
Pulse Duration (us)	<input type="text"/>
Pulse Frequency (Hz)	<input type="text"/>
Sweep Frequency (Hz)	<input type="text"/>
Conveyor Speed (cm/s)	<input type="text"/>
$D_{\min} / D_{\max}$	<input type="text"/>
$D_{\max} / D_{\min}$	<input type="text"/>

PROVIDE IRRADIATION SCHEME

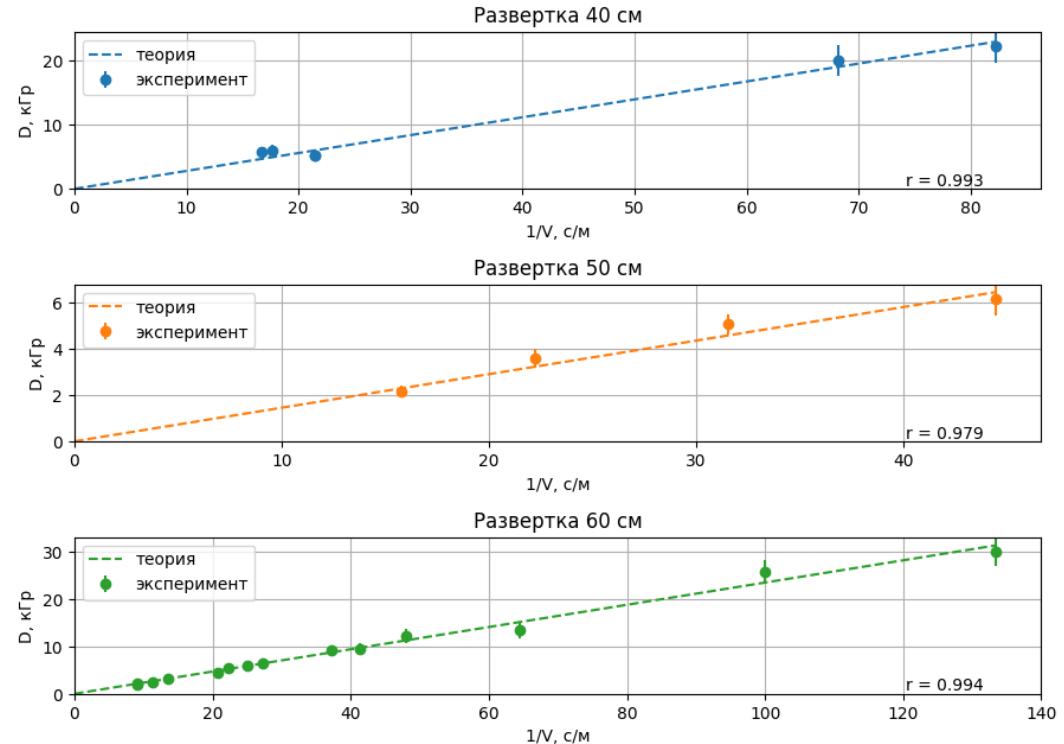
Dose top (Gy)	<input type="text"/>
Dose mid (Gy)	<input type="text"/>
Dose bot (Gy)	<input type="text"/>

0 mm	<input type="text"/>	<input type="text"/>
9 mm	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Expected  
Uniformity

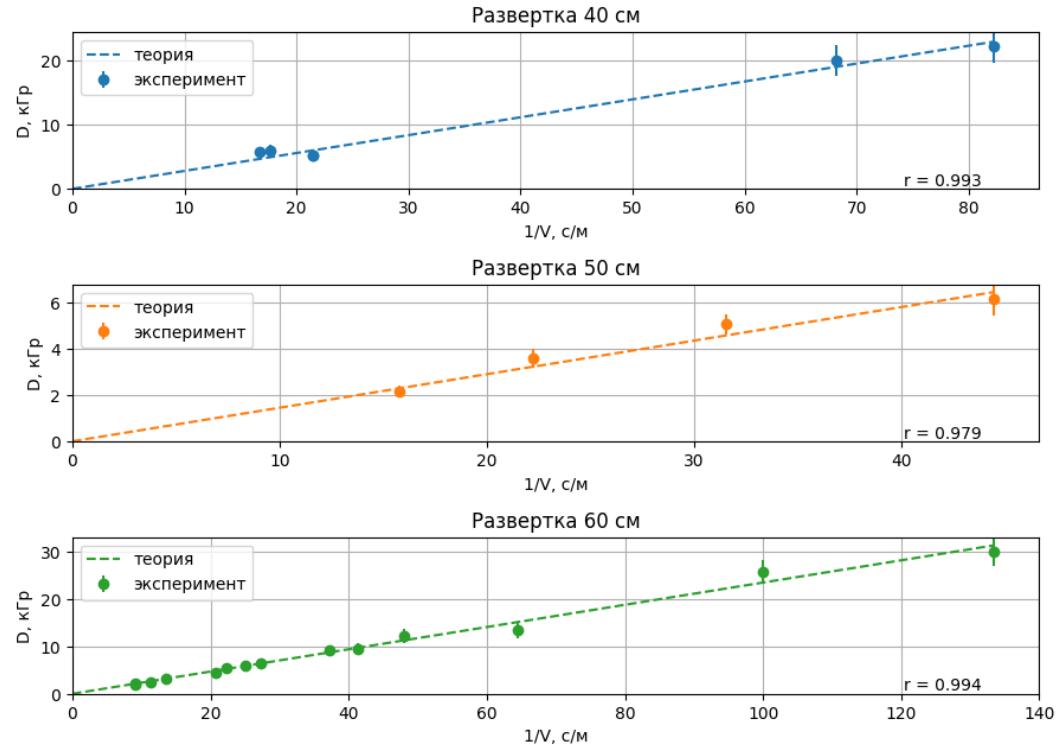
CALIBRATE IRRADIATION  
SCHEME

Графический пользовательский интерфейс  
системы «Demetra».



Экспериментально измеренная (синие точки) и рассчитанная с помощью Demetra (оранжевая прямая) поверхностная доза, соответствующая введенным параметрам ускорителя и скорости конвейера  $V$ .

# Расчет параметров РТУ для доставки объекту заданной дозы



Экспериментально измеренная (синие точки) и рассчитанная с помощью Demetra (оранжевая прямая) поверхностная доза, соответствующая введенным параметрам ускорителя и скорости конвейера V.

# ВЫВОДЫ

1. Установлена зависимость изменения энергетического спектра ускоренных электронов по мере их распространения в воздухе для энергий до 25 МэВ и пути в воздухе до 140 см. Показано, что изменение спектра описывается интегральной свёрткой спектра источника с ядром, выражающимся через распределения Ландау. Полученное преобразование обладает полугрупповым свойством эволюционных операторов, что позволяет описывать изменение спектра на произвольном расстоянии как последовательное действие операторов для отдельных участков траектории.
2. Разработан и реализован метод восстановления энергетического спектра источника электронов по спектру, измеренному в произвольной точке на траектории пучка. Для решения обратной задачи использован метод Ю.П. Пытьева в виде SVD-разложения с фильтрацией сингулярных чисел, обеспечивающий устойчивость решения при зашумлении данных до 75%. Показано, что при использовании незашумлённых данных восстановление исходного спектра выполняется без потери информации.
3. Предложен трёхэтапный метод восстановления энергетического спектра ускорителя электронов по центрально-осевым глубинным дозовым распределениям, измеренным в промышленных и клинических фантомах. Метод обеспечивает устойчивость формы восстановленного спектра относительно параметра регуляризации в методе А.Н. Тихонова и позволяет восстанавливать спектр с шагом 0.1 МэВ и погрешностью не более 5%.
4. Экспериментальная проверка разработанных методов показала согласие восстановленных энергетических спектров с экспериментально измеренными в пределах 5%.
5. Теоретические результаты, полученные в ходе исследования, положены в основу систем дозиметрического планирования радиационной обработки «Demetra» и «DosePreview». Системы прошли экспериментальную проверку и внедрены в практику дозиметрического планирования в центре промышленной радиационной обработки «Axenter» (г. Дубна).

# Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в **9 статьях** в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защит в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности и отрасли наук.

Получено **3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ**.

# Апробация работы

Основные результаты и положения диссертации докладывались автором и обсуждались в **26 докладах международных и всероссийских конференциях**, научных школах и семинарах.

# Грантовая поддержка исследований

Проведенные исследования выполнялись при финансовой поддержке следующих научных фондов:

- 1. Российский научный фонд** (грант № 22-63-00075) по проекту "Поиск биохимических маркеров идентификации радиационной обработки объектов органического происхождения" (участник)
- 2. Фонд содействия инновациям** (программа "Старт-1"), что позволило реализовать прикладные аспекты разработки.

# Спасибо за внимание!

Золотов Сергей Александрович  
Telegram @ignobilium  
E-mail zolotov.sa15@physics.msu.ru

# Соответствие паспорту специальности

Исследование соответствует следующим пунктам паспорта специальности 1.3.18:

1. Получение пучков заряженных частиц, **расчетно-теоретические** и экспериментальные **исследования параметров пучков**.
7. **Расчетно-теоретические** и экспериментальные **исследования взаимодействий пучков заряженных частиц** с электромагнитными полями, друг с другом, с молекулами остаточного газа и **мишениями**.

## Апробация результатов

Основные результаты и положения диссертации докладывались автором и обсуждались в 26 **докладах международных и всероссийских конференциях**, научных школах и семинарах, среди которых:

- Международная конференция «Ядро» – 2021 – 2025;
- Всероссийская школа НЦФМ по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорительной технике – 2025;
- Международный симпозиум МАГАТЭ «International Symposium on Food Safety and Control» – 2024;
- Международная конференция FQFS – 2024, 2025;
- Международная конференция RAP – 2022 – 2024;
- Международная конференция RAD – 2022;
- Международная научно-практическая конференция «Полярное сияние» – 2025;
- Международная молодёжная конференция «Генетические и радиационные технологии в сельском хозяйстве» – 2022 – 2025;
- Межвузовская научная школа-конференция имени Б.С. Ишханова «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» – 2021 – 2022.
- Научная конференция «Ломоносовские чтения» – 2020, 2023 – 2025;

Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» – 2022, 2023;

## Публикации по теме диссертации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 9 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защит в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности и отрасли наук:

1. **Zolotov, S.A.** Landau distribution-based regularized algorithm for reconstruction of electron beam energy spectrum using depth dose distributions in targeted materials / **Zolotov S.A.**, Bliznyuk U.A., Nikitchenk A.D., Studenikin F.R., Antipina N.A., Borshchegovskaya P.Yu., Chernyaev A.P., Ipatova V.S., Toropygin M.I., Nikolaeva A.A. // *Physica Scripta* – 2025. – Vol.100, № 4. – P.045020; Импакт-фактор 2.6 (JIF), **Q2**; 1.2 п.л.; EDN: PGEGVM
2. Kozlova, E.K. Optimization Function for Determining Optimal Dose Range for Beef and Seed Potato Irradiation / Kozlova Elena, Bliznyuk Ulyana, Chernyaev Alexander, Borshchegovskaya Polina, Braun Arcady, Ipatova Victoria, **Zolotov Sergey**, Nikitchenko Alexander, Chulikova Natalya, Malyuga Anna, Zubritskaya Yana, Bolotnik Timofey, Oprunenko Anastasia, Kozlov Aleksandr, Beklemishev Mikhail, Yagudina Roza, Rodin Igor // *Foods* – 2024. – Vol.13., № 23 – P.3729; Импакт-фактор 5.1 (JIF), **Q1**; 3 п.л.; EDN: NIELWW
3. **Zolotov, S.A.** DosePreview Software for Rapid Planning of Radiation Processing of Biological Objects and Materials / **Zolotov S.A.**, Bliznyuk U.A., Antipina N.A., Nikitchenko A.D., Nikolaeva A.A., Studenikin F.R., Chernyaev A.P. // *Physics of Atomic Nuclei* – 2024. – Vol.87, Suppl 3. – P.S452-S.460; Импакт-фактор 0.4 (JIF), **Q4**; 0.6 п.л. EDN: DNYQHX
4. Чуликова, Н.С. Радиационная обработка семенного картофеля как метод подавления различных форм ризоктониоза на клубнях нового урожая / Н.С. Чуликова, А.А. Малюга, У.А. Близнюк, П.Ю. Борщеговская, **С.А. Золотов**, Я.В. Зубрицкая, В.С. Ипатова, А.П. Черняев, И.А. Родин // *Агрохимия* – 2023. - № 2. – С.69-78; Импакт-фактор 0.332 (РИНЦ); 1.2 п.л.; EDN: MSHQZY  
Chulikova, N.S. Radiation Processing of Seed Potatoes as a Method for Suppressing Various Forms of Rhizoctonia in New Crop Tubers // Chulikova N.S., Malyuga A.A., Bliznyuk U.A., Borshchegovskaya P.Yu., **Zolotov S.A.**, Zubritskaya Ya.V., Ipatova V.S., Chernyaev A.P., Rodin I.A. // *Russian agricultural sciences* – 2023 – Vol.49, Suppl 1 – P.S104-S112; Импакт-фактор 0.332 (РИНЦ); 1.2 п.л.; EDN: KQSUTQ

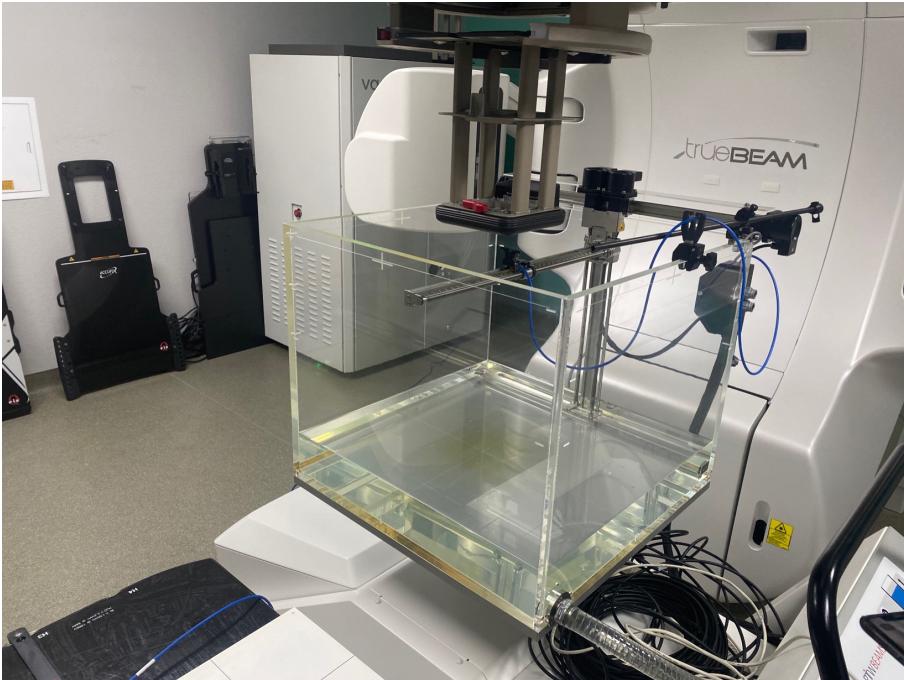
5. Близнюк, У.А. Восстановление глубинных распределений поглощенной дозы при прохождении пучков электронов через вещество / Близнюк У.А., Борщеговская П.Ю., **Золотов С.А.**, Ипатова В.С., Крусанов Г.А., Никитченко А.Д., Студеникин Ф.Р., Черняев А.П. // Физика элементарных частиц и атомного ядра – 2023. – Т.54, № 4. – С. 728-737; Импакт-фактор 0.485 (РИНЦ); 0.8 п.л.; EDN: IHPHEV Bliznyuk U.A., Reconstruction of Depth Dose Distributions in Materials Created by Electron Beam / Bliznyuk U.A., Borshchegovskaya P.Yu., **Zolotov S.A.**, Ipatova V.S., Krusanov G.A., Nikitchenko A.D., Studenikin F.R., Chernyaev A.P. // Physics of Particles and Nuclei – 2023. – Vol.54. – P. 575-580; Импакт-фактор 0.5 (JIF), **Q3**; 0.8 п.л.; EDN: LSHIHT
6. **Золотов, С.А.** Комбинация алюминиевых пластин различной толщины для повышения однородности радиационной обработки ускоренными электронами / **Золотов С.А.**, Близнюк У.А., Студеникин Ф.Р., Борщеговская П.Ю., Крусанов Г.А. // Письма в ЭЧАЯ – 2023 – Т.20, № 4(249); Импакт-фактор 0.274 (РИНЦ); 0.6 п.л.; EDN: FNRKXL **Zolotov, S.A.** Combination of Aluminum Plates of Different Thicknesses to Increase the Homogeneity of Radiation Treatment by Accelerated Electrons / Zolotov S.A., Bliznyuk U.A., Studenikin F.R., Borshchegovskaya P.Yu., Krusanov G.A. // Physics of Particles and Nuclei Letters – 2023. – Vol.20. – P.954-958; Импакт-фактор 0.4 (JIF), **Q4**; 0.6 п.л.; EDN: YMTFLC
7. Chulikova, N.S. Electron Beam Irradiation to Control Rhizoctonia solani in Potato / Chulikova Natalya, Malyuga Anna, Borshchegovskaya Polina, Zubritskaya Yana, Ipatova Victoria, Chernyaev Alexander, Yurov Dmitry, **Zolotov Sergei**, Nikitchenko Alexander, Bliznyuk Ulyana, Rodin Igor // Agriculture-Basel – 2023. – Vol.13, № 6. – P.1221; Импакт-фактор 3.6 (JIF), **Q1**; 2 п.л.; EDN: WXKDDQ
8. Studenikin, F.R. Electron beam modification for improving dose uniformity in irradiated objects / Studenikin F.R., Bliznyuk U.A., Chernyaev A. P., Krusanov G.A., Nikitchenko A.D., **Zolotov S.A.**, Ipatova V.S. // European Physical Journal: Special Topics – 2023. – Vol.232. – P.1631-1635; Импакт-фактор 2.3 (JIF), **Q2**; 0.6 п.л.; EDN: TKYBTG
9. Чуликова, Н.С. Влияние пучка ускоренных электронов с энергией 1 МэВ на рост и микрофлору картофеля / Чуликова Н.С., Малюга А.А., Близнюк У.А., Черняев А.П., Борщеговская П.Ю., **Золотов С.А.**, Никитченко А.Д., Зубрицкая Я.В., Юров Д.С. // Известия РАН. Серия физическая – 2022. – Т.86, № 12. – С. 1817-1824; Импакт-фактор 0.695 (РИНЦ); 1 п.л.; EDN: AYDYPE Chulikova, N.S. Impact of 1-MeV Electron Beam Irradiation on the Phenology and Microflora of Potatoes / Chulikova N.S., Malyuga A.A., Bliznyuk U.A., Chernyaev A.P., Borschegovskaya P.Yu., **Zolotov S.A.**, Nikitchenko A.D., Zubritskaya Ya.V., Yurov D.S. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics – 2022. – Vol.86, № 12. – P. 1549-1556; Импакт-фактор 0.253 (SJR), **Q3**; 1 п.л.; EDN: IYCPME

## Получены 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

1. DEMETRA by IRT : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023669934 / А.П. Черняев, В.В. Ханкин, У.А. Близнюк, **С.А. Золотов**, Ф.Р. Студеникин; правообладатель – ООО «Промышленные радиационные технологии». — 22.09.2023.
2. Dose Preview by IRT : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023669628 / А.П. Черняев, В.В. Ханкин, У.А. Близнюк, **С.А. Золотов**, Ф.Р. Студеникин; правообладатель – ООО «Промышленные радиационные технологии». — 18.09.2023.
3. Система планирования промышленной радиационной обработки "Туя" : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025691280 / **Золотов С.А.**, Близнюк У.А., Борщеговская П.Ю., Никитченко А.Д., Родин И.А., Студеникин Ф.Р., Черняев А.П.; правообладатель — Золотов Сергей Александрович. — 13.11.2025

# Материалы и методы

## Измерение глубинных дозовых распределений на ускорителе электронов Varian TrueBeam



Измерение распределений поглощенной дозы в водном фантоме PTW BeamScan на медицинском ускорителе электронов *Varian TrueBeam*.

### Основная информация об эксперименте:

- Ускоритель электронов VarianTrueBeam, энергия пучка 6 МэВ, 9 МэВ (НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н.Н. Бурденко, г. Москва);
- Водный фантом PTW BeamScan;
- Ионизационная камера PTW Semiflex 3D;
- Измерения по протоколу МАГАТЭ TRS-398.



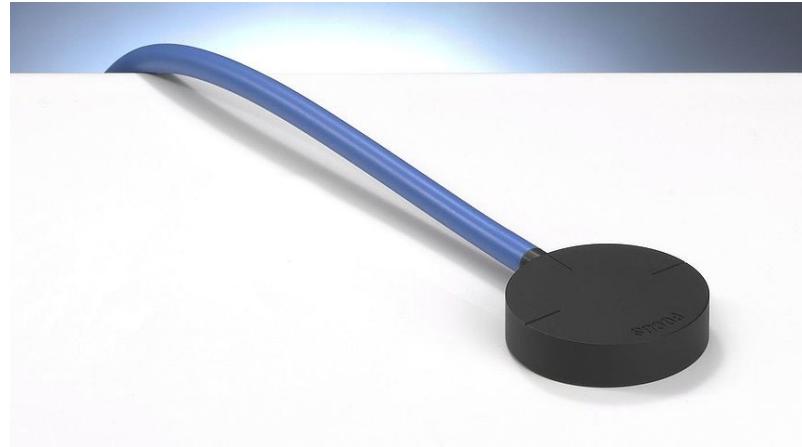
Ионизационная камера PTW Semiflex 3D.

# Измерение поглощенной дозы



Ионизационная камера  
Semiflex 3D (для водного фантома)

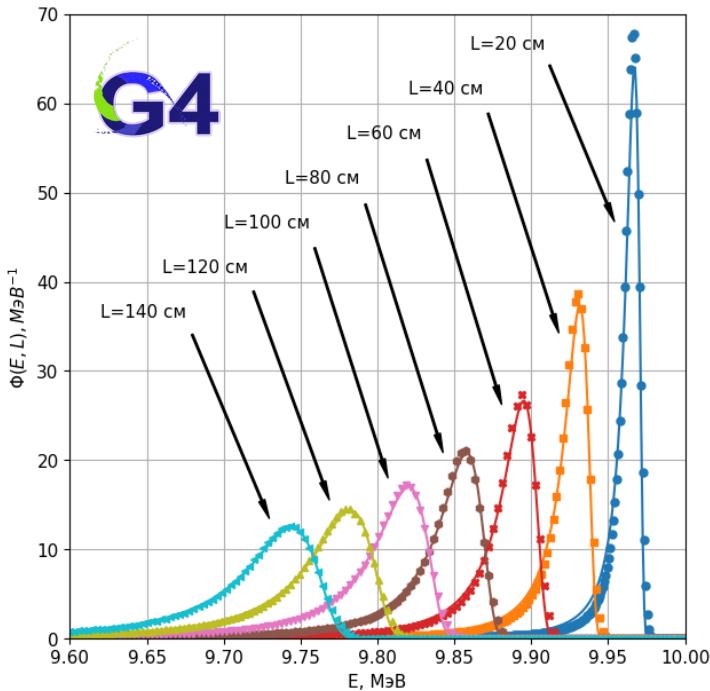
Чувствительный объем:  $0.125 \text{ см}^2$   
Диапазон температур:  $10 - 40^\circ\text{C}$   
Точность измерения: 4% при энергиях больше  
140 кэВ  
Временное разрешение: 121 мкс



Ионизационная камера  
Roos Chamber (для фантома из твердой воды)

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

# Изменение энергетического спектра пучка электронов по мере его распространения в воздухе



Энергетические спектры  $\Phi(E, L)$  электронов с начальной энергией 10 МэВ, прошедших в воздухе путь до 140 см (расчет, инструментарий Geant4).

Полученные в компьютерном моделировании данные аппроксимировались с помощью распределения Ландау:

$$\Phi(E) = \lambda \left( \frac{E_0 - E - a}{b} \right),$$

где  $E_0$  — начальная энергия электронов;  $a$  — параметр сдвига;  $b$  — параметр масштаба;  $\lambda(x)$  — распределение Ландау:

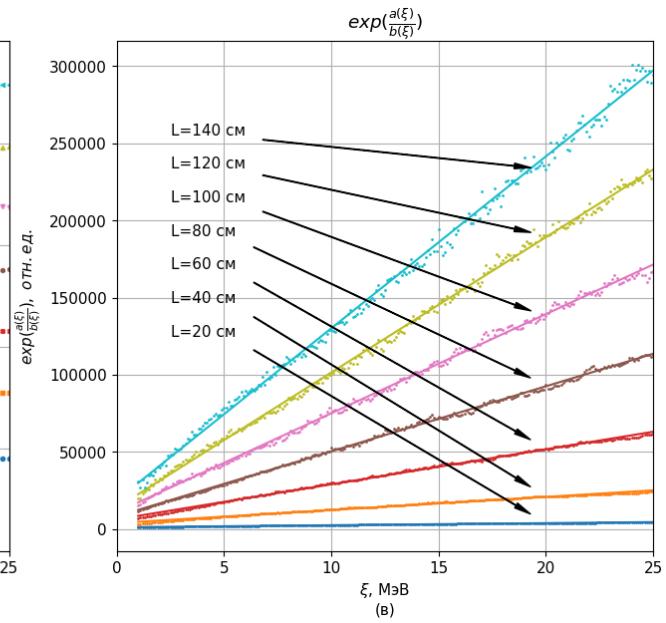
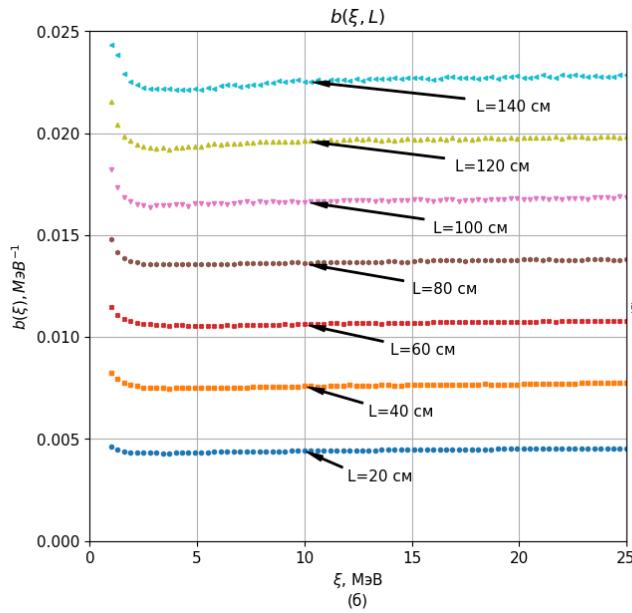
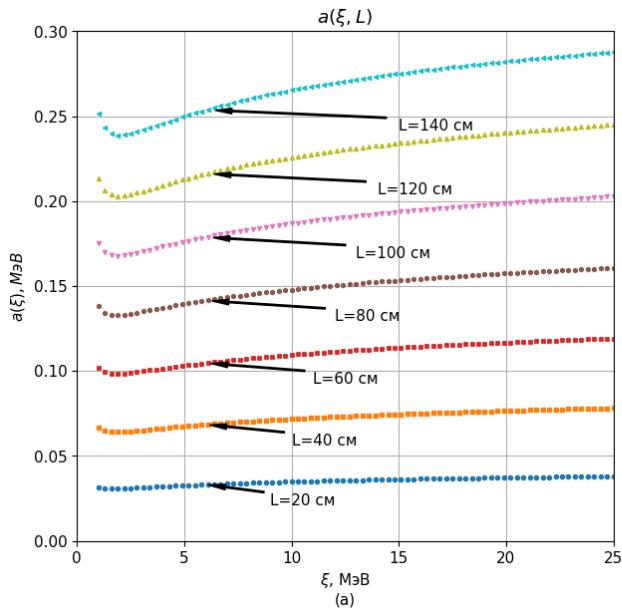
$$\lambda(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \exp(-t \log(t) - xt) \sin(\pi t) dt$$

Спектр пучка электронов  $\Phi(E)$ , прошедших в воздухе путь  $L$ , связан с начальным спектром электронов  $\Phi_0(E)$  следующим соотношением:

$$\Phi(E, L) = \Lambda(L) [\Phi_0(E)] = \int_0^{E_{\max}} \Phi_0(\xi) \lambda\left(\frac{\xi - E - a(\xi, L)}{b(\xi, L)}\right) d\xi$$

Показано, что действие на спектр оператором при длине пути  $L_1 + L_2$  равнозначно последовательному действию операторов при длинах пути  $L_1$  и  $L_2$ :

$$\Lambda(L_1 + L_2) = \Lambda(L_1) \circ \Lambda(L_2)$$

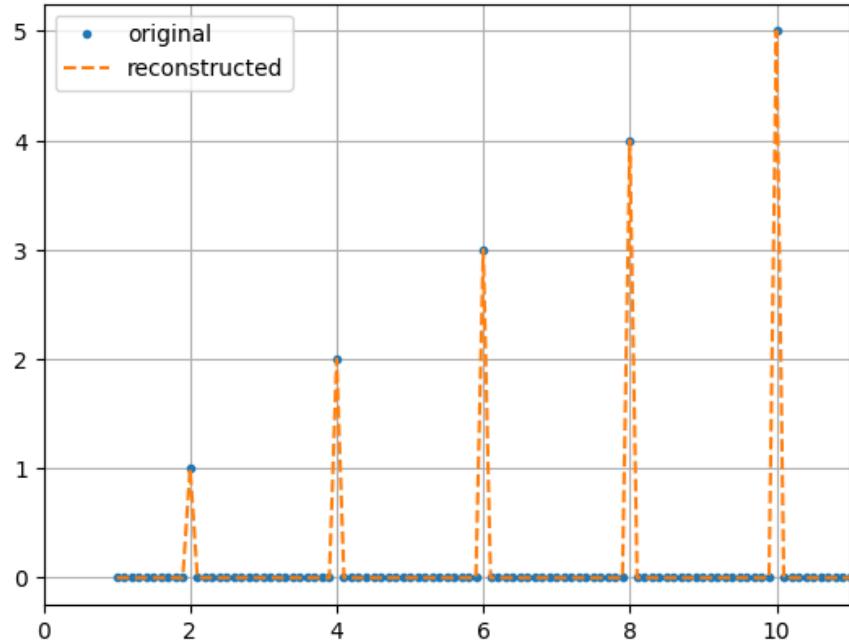


$$a(\xi, L) = \exp(a_0(L) \xi + a_1) - \frac{a_2(L)}{(\xi - a_3(L))^2 + a_4(L)} + a_5(L)$$

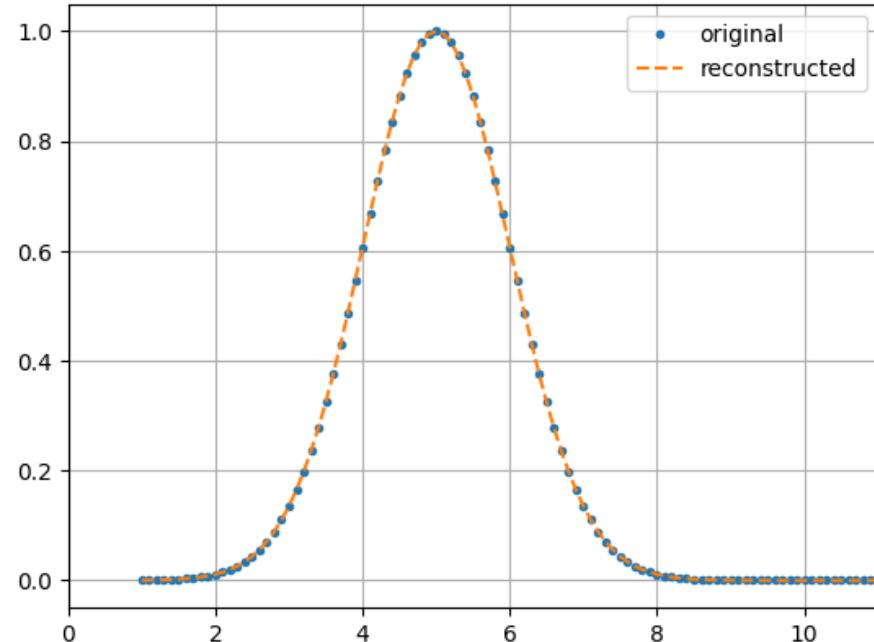
$$\frac{1}{b(\xi, L)} = b_0(L) \cdot \left( \frac{b_1(L)}{(\xi + b_2(L))^2} + b_3(L) + \exp(-b_4(L) \xi + b_5(L)) \right)$$

$$\exp\left(\frac{a(\xi, L)}{b(\xi, L)}\right) = k(L) \xi + w(L)$$

# Восстановление энергетического спектра источника излучения по спектру, измеренному на известном расстоянии от него



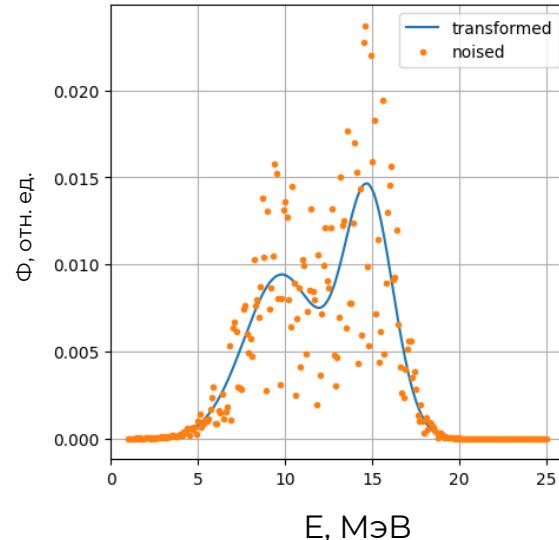
Начальный (синие точки) и восстановленный (оранжевые штрихи) дискретный энергетический спектр электронов



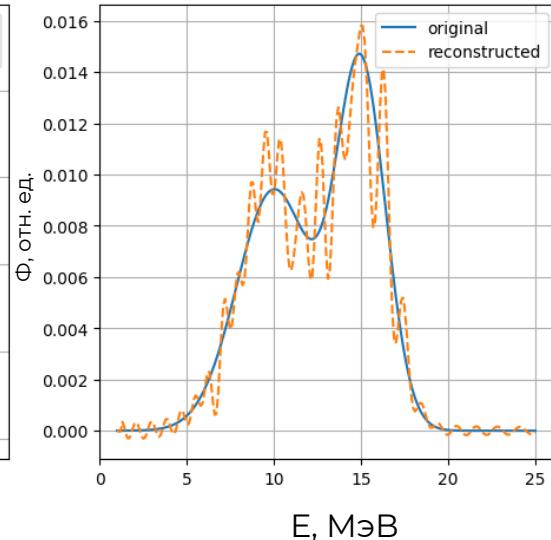
Начальный (синие точки) и восстановленный (оранжевые штрихи) энергетический спектр электронов, подчиняющийся распределению Гаусса

# Результаты

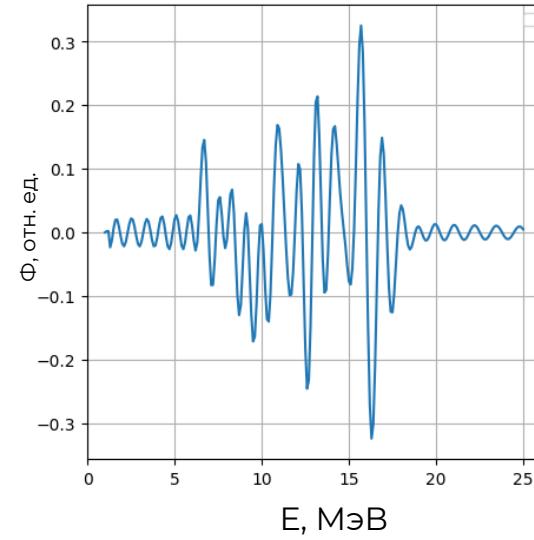
Решение обратной задачи восстановления энергетического спектра пучка электронов с погрешностью 75% во входных данных



а



б



в

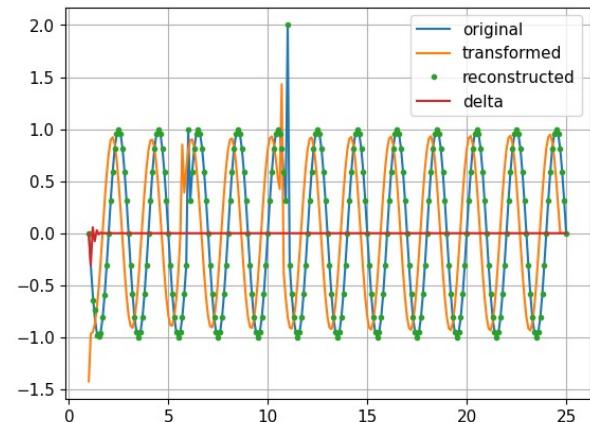
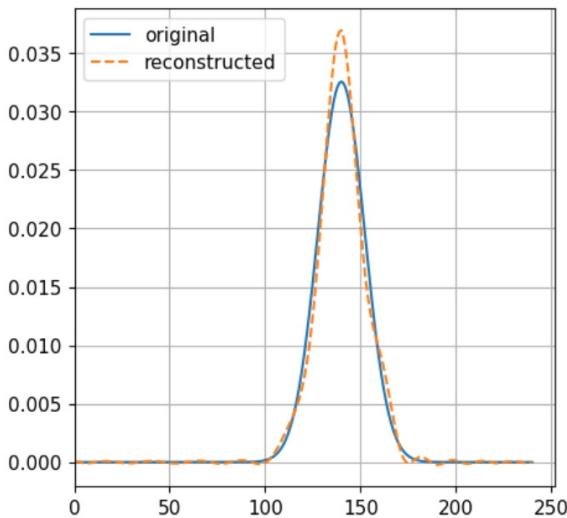
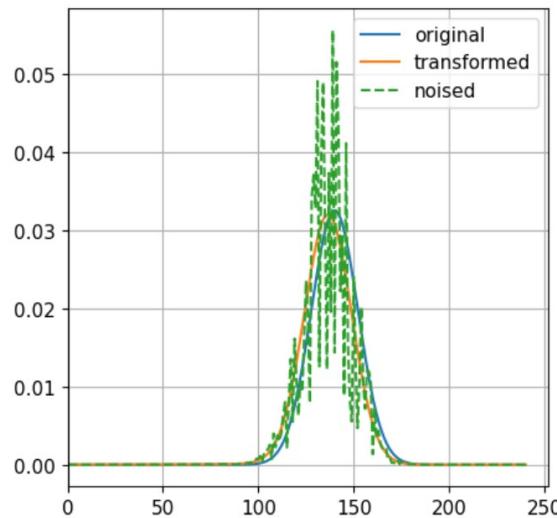
(а) Энергетический спектр без погрешности (синяя кривая) и с искусственно внесенной 75%-  
погрешностью (оранжевые точки) для решения обратной;

(б) начальный (синяя кривая) и восстановленный (оранжевая прерывистая) энергетические спектры;

(в) разница между восстановленным и начальным спектрами

noise error: 0.8396160715825876

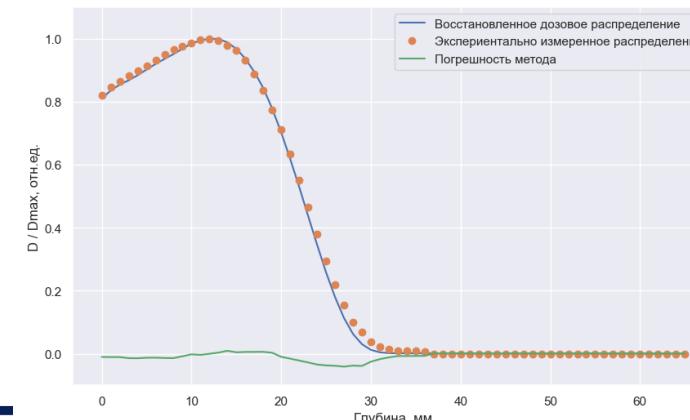
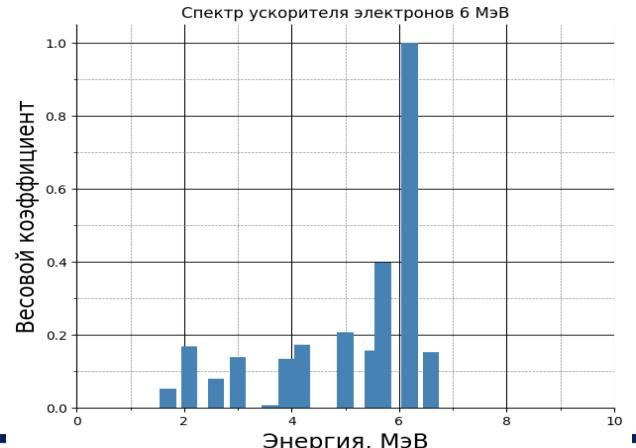
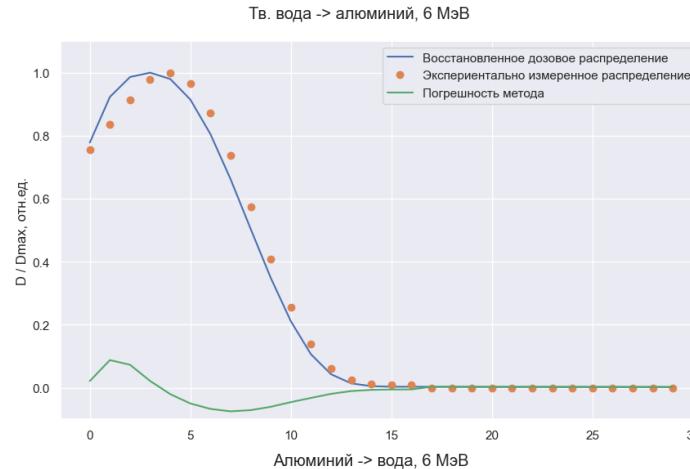
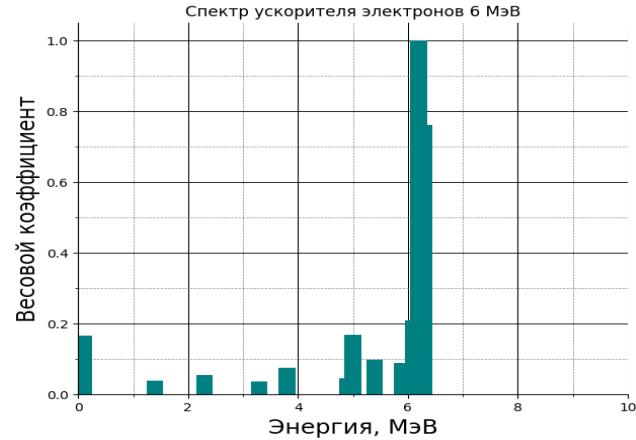
reconstruction error: 0.26437157943404005



Восстановление энергетического спектра  
источника электронов по данным с 75%-  
шумом

Восстановление по  
данным без шума.

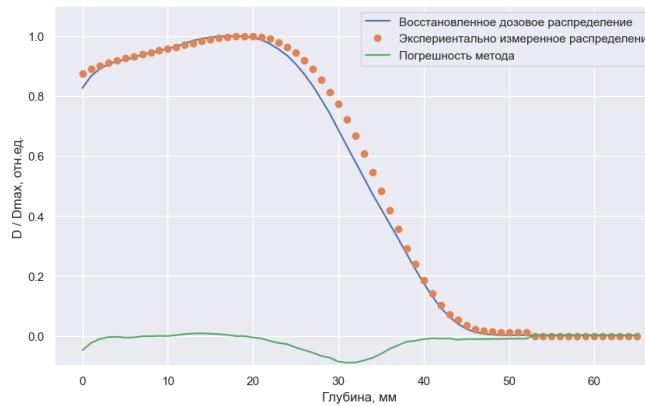
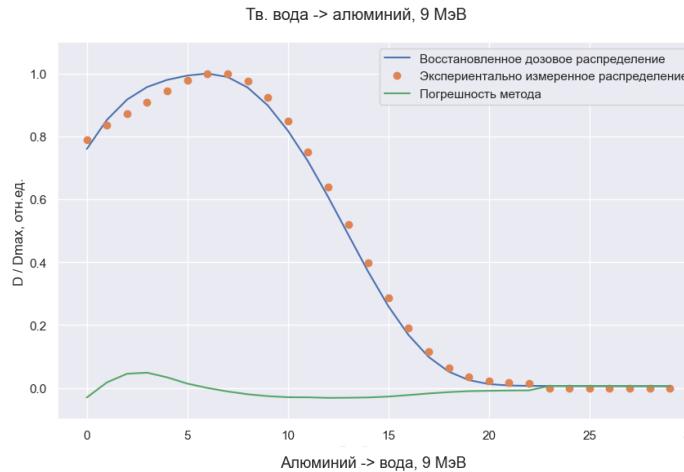
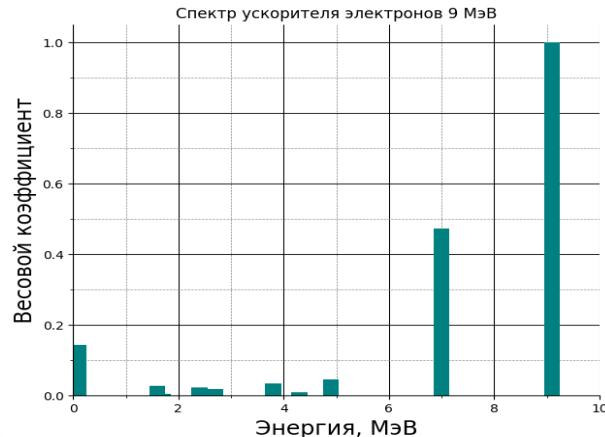
# Восстановление спектра в режиме 6 МэВ



а) Доза в тв. воде  $\rightarrow$   
спектр  $\rightarrow$  доза в  
алюминии

б) Доза в алюминии  $\rightarrow$   
спектр  $\rightarrow$  доза в тв.  
воде

# Восстановление спектра в режиме 9 МэВ



а) Доза в тв. воде  $\rightarrow$   
спектр  $\rightarrow$  доза в  
алюминии

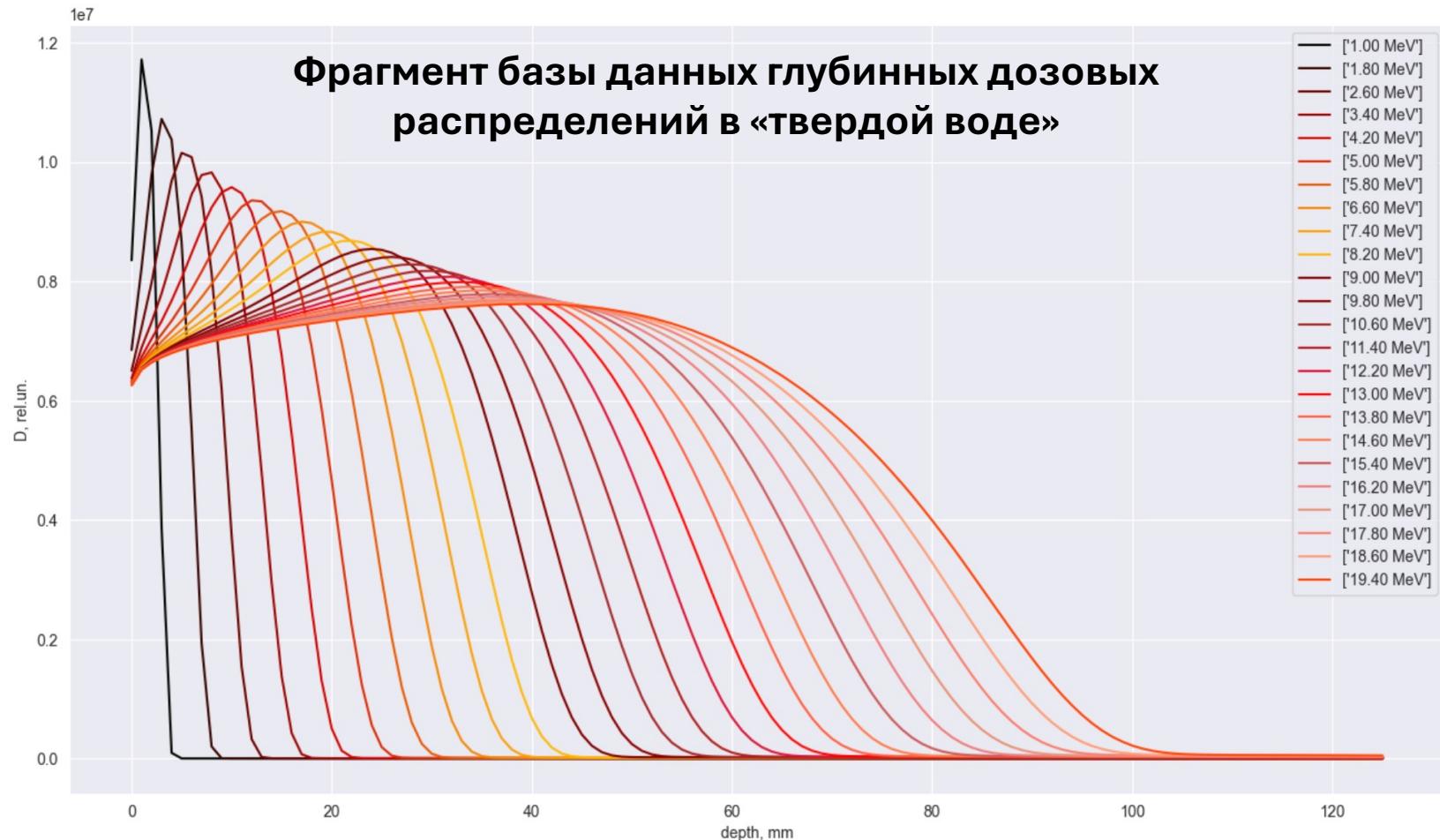
б) Доза в алюминии  $\rightarrow$   
спектр  $\rightarrow$  доза в тв.  
воде

Таблица 1. Средние значения относительных ошибок  $\delta D_{rest}$  в распределениях поглощенной дозы в воде, восстановленных по известным измеренным распределениям дозы в воде, алюминии и графите для различных значений вносимых погрешностей  $\sigma$

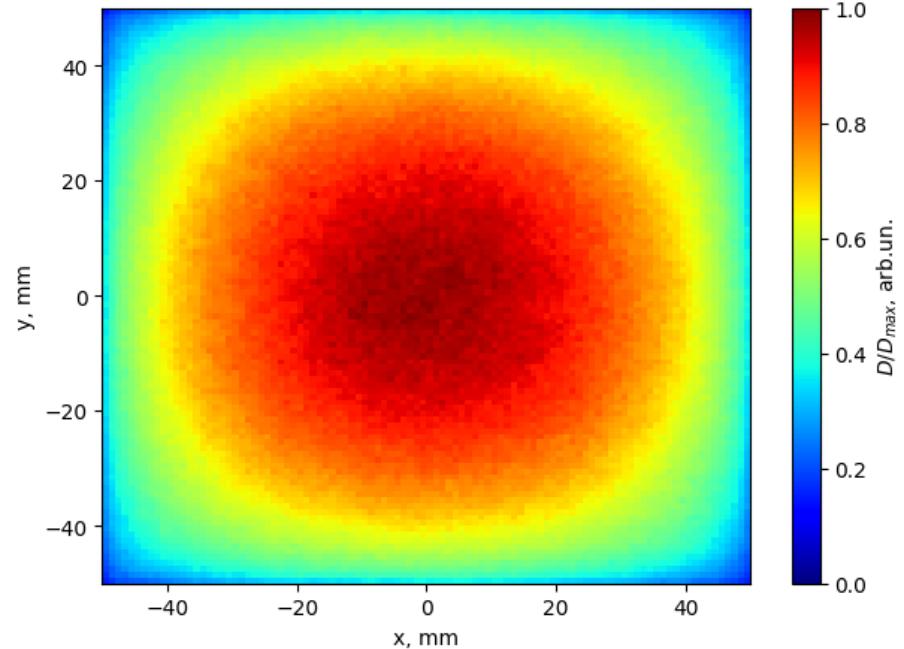
Режим работы ускорителя	Опорный материал	Относительная ошибка дозового распределения в опорном материале, %				
		1	2	5	10	15
Режим 1 (6 МэВ)	Al	0,8	1,5	3,3	6,2	9
	Тв. вода	0,6	1,1	2,6	5	7,3
	$H_2O$	0,4	0,9	2	3,9	5,6
Режим 2 (9 МэВ)	Al	0,5	0,9	2,2	4,2	6
	Тв. вода	0,4	0,8	1,8	3,6	5,2
	$H_2O$	0,3	0,6	1,4	2,7	4

Таблица 2. Средние значения относительных ошибок  $\delta D_{rest}$  восстановленных распределений поглощенной дозы в воде, используя известные распределения дозы в воде, алюминии и графите, с учетом дисперсии ошибок, возникающих при измерении значений дозы в материалах, облученных электронным пучком в двух режимах работы ускорителя.

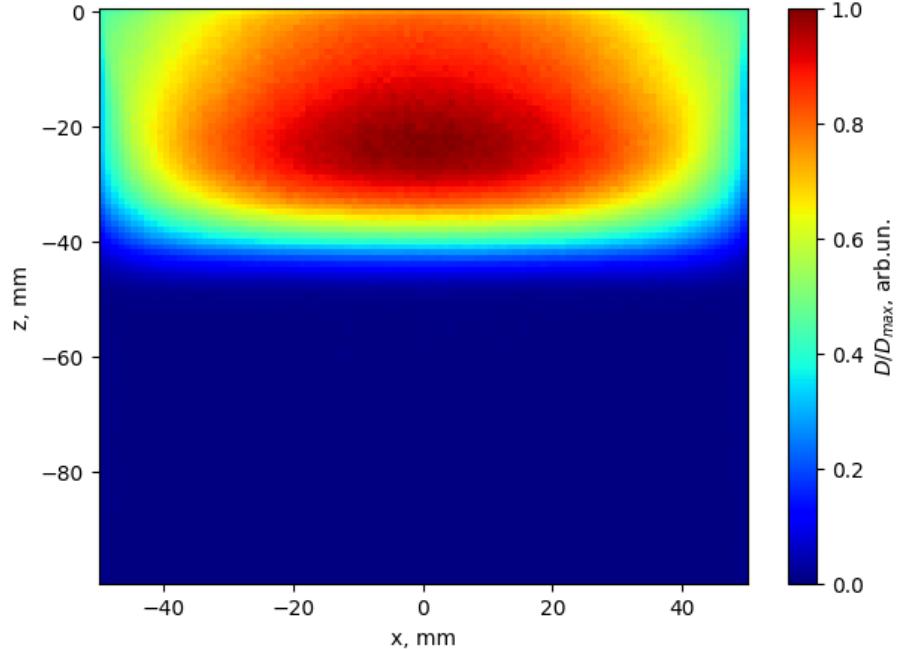
Режим работы ускорителя	Опорные материалы	Относительная ошибка дозового распределения в опорном материале, %				
		1	2	5	10	15
Режим 1 (6 МэВ)	Тв. вода, $H_2O$	0,4	0,7	1,7	3,2	4,7
	Al, $H_2O$	0,4	0,8	1,8	3,4	4,9
	Al, Тв. вода	0,5	0,9	2,2	4,1	6
	Al, Тв. вода, $H_2O$	0,3	0,6	1,5	2,9	4,2
Режим 2 (9 МэВ)	Тв. вода, $H_2O$	0,2	0,5	1,2	2,2	3,3
	Al, $H_2O$	0,3	0,5	1,2	2,3	3,4
	Al, Тв. вода	0,3	0,6	1,5	2,8	4,1
	Al, Тв. вода, $H_2O$	0,2	0,4	1	2	3



# Проекции объемных дозовых распределений



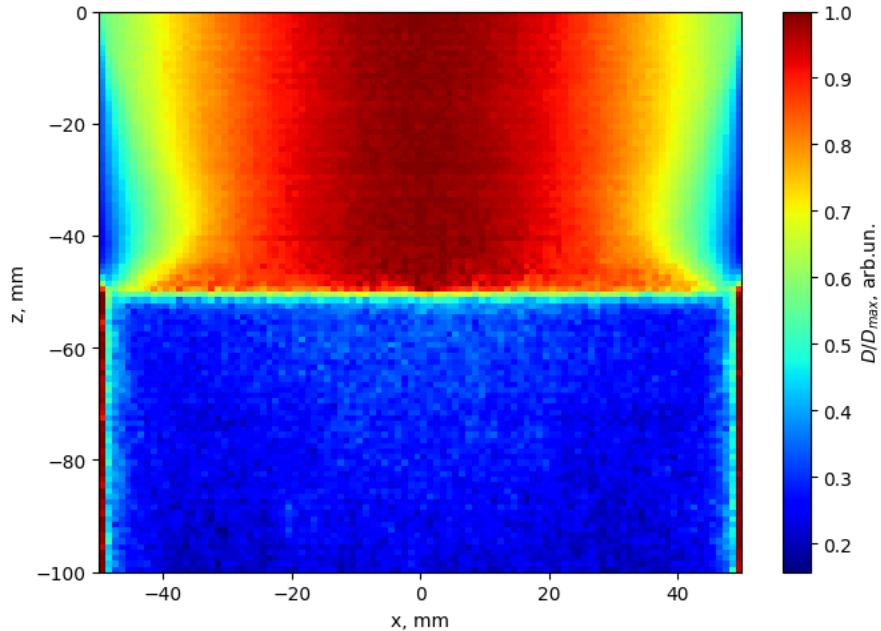
Профиль дозы (расчет инструментарий Geant4) на поверхности водного фантома (10x10x10) см при облучении параллельным пучком электронов (10x10) см с энергией 10 МэВ.



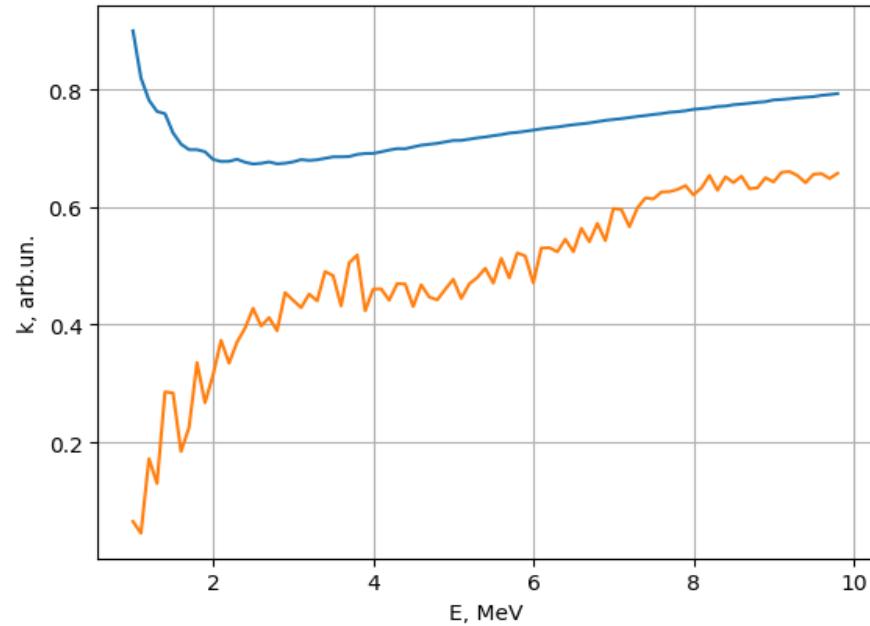
Распределение поглощенной дозы (расчет инструментарий Geant4) в центральном срезе кубического водного фантома (10x10x10) см при облучении параллельным пучком электронов (10x10) см с энергией 10 МэВ.

# Результаты

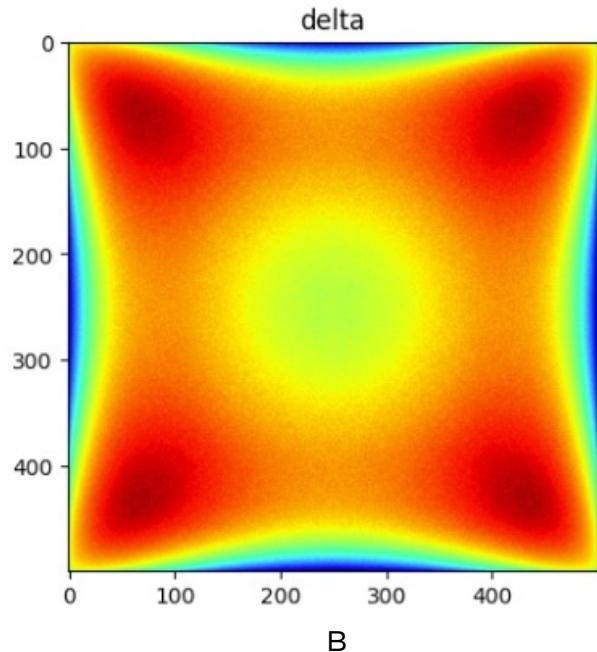
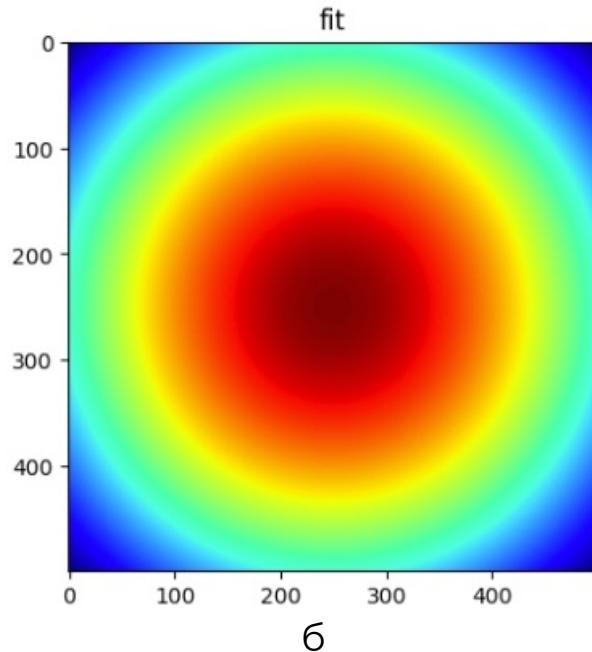
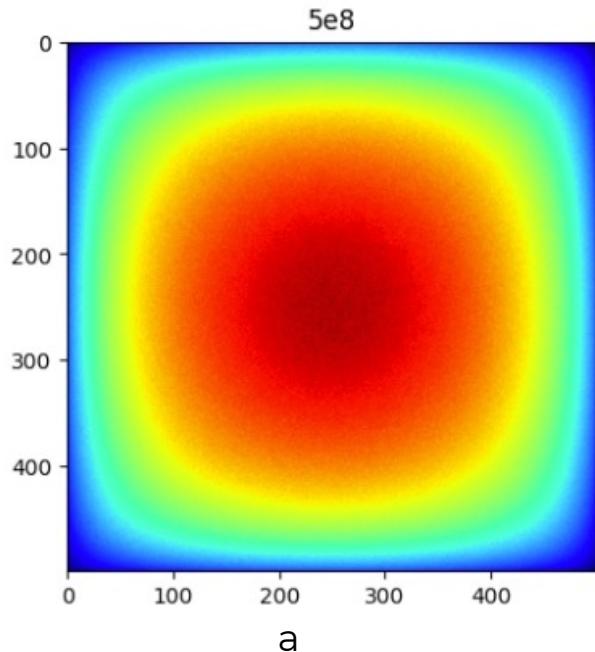
## Оценка поперечной однородности распределения поглощенной дозы



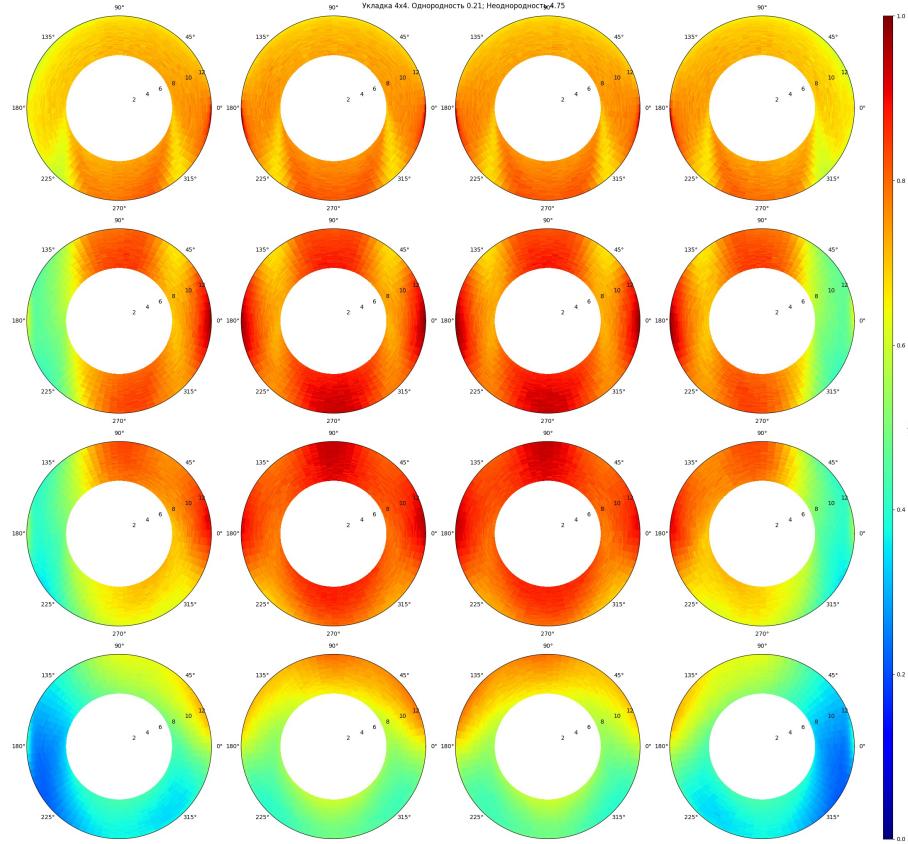
Цветовая карта профилей поглощенной дозы (расчет инструментарий Geant4) на глубинах 0-100 мм в кубическом водном фантоме (10x10x10) см при облучении параллельным пучком электронов (10x10) см с энергией 10 МэВ.



Оценка однородности радиационной обработки (расчет инструментарий Geant4) электронами с энергией до 10 МэВ по глубинным (синяя кривая) и объемным (оранжевая кривая) дозовым распределениям.



(а) распределение поглощенной дозы  $D(x,y)$  на глубине  $z=20$  мм в водном фантоме; (б) основная компонента  $D(x,y)$  в виде двумерного распределения Гаусса; (в) поправочная компонента  $D(x,y)$  в виде X-образной четырехлепестковой азимутально анизотропной функции.



Распределение поглощенной дозы (расчет, инструментарий Geant4) по объему термоусаживаемых изделий в укладке 4x4.

## Центральный срез по объемному дозовому в полых цилиндрических фантомах

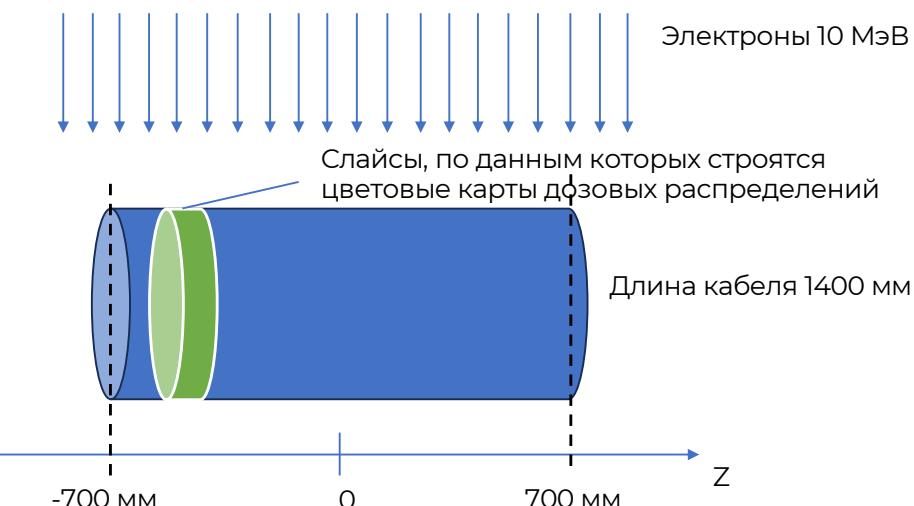
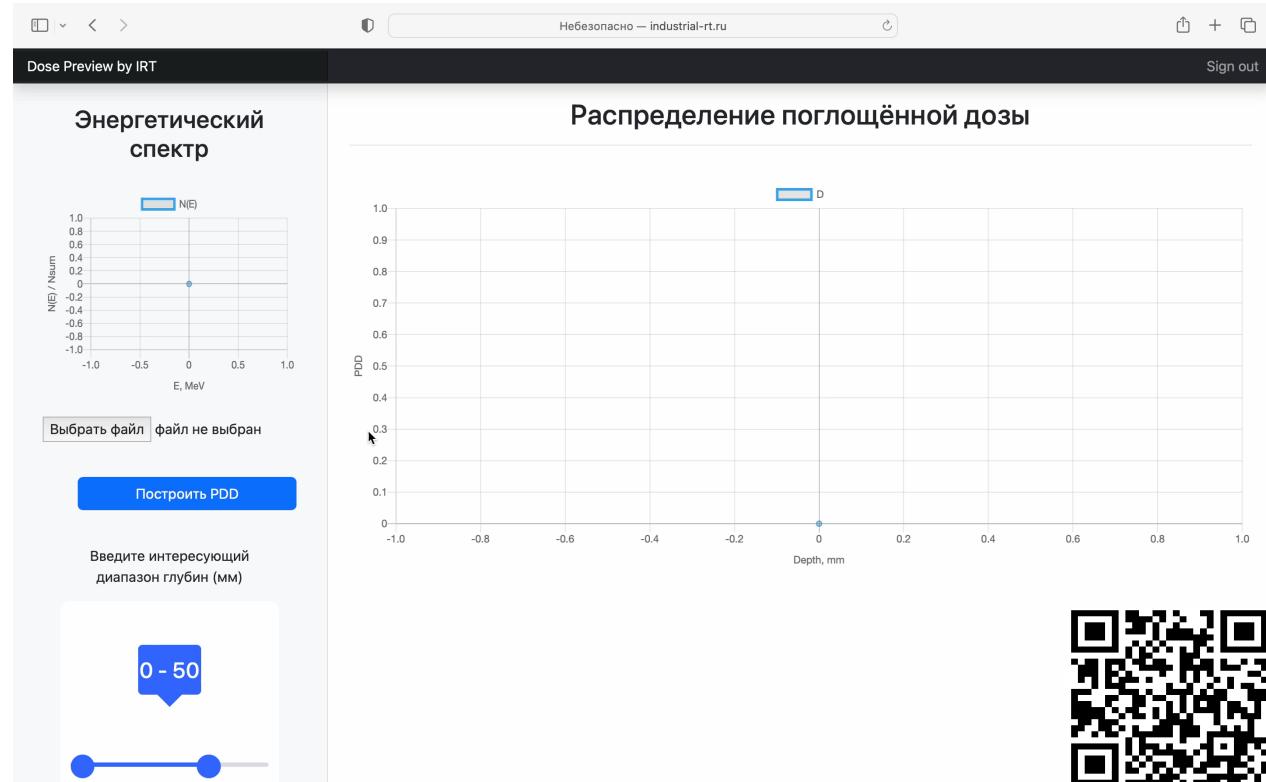


Схема моделирования для расчета распределения поглощенной дозы по объему термоусаживаемых изделий.

# Результаты

## Автоматизация расчета глубинных дозовых распределений по известному энергетическому спектру электронов



# Ускорители в мировом хозяйстве?



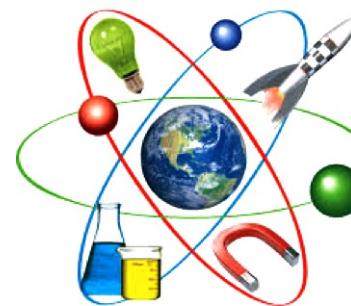
Промышленность  
~ 28 000



Медицина  
~ 13 150

ВСЕГО: более 43 850

Наука  
~ 1 200



Сельское  
хозяйство  
~ 1 500



# Преимущества радиационной обработки

## Преимущества обработки



Сохранение вкуса, аромата и полезных свойств при отсутствии нагрева и химии



Высокая проникающая способность и отсутствие остаточного проникающего агента



Возможность обработки в упаковке, что исключает повторное загрязнение



Высокая скорость и большие объемы обработки



**ПРОДУКЦИЯ ОСТАЕТСЯ БЕЗОПАСНОЙ**  
Ионизирующее излучение разрывает химические связи вредных микроорганизмов и не оставляет никаких остаточных следов



### Спектр решаемых задач:

Увеличение сроков хранения пищевой продукции животного и растительного происхождения



Предотвращение прорастания корне- и клубнеплодов при длительном хранении



Замедление созревания свежих фруктов и овощей до коммерческой реализации



Дезинсекцию (например, зерна) после сбора урожая



Стимулирование роста и развития посевного материала, повышение урожайности

# Материалы и методы

## Эксперимент с обработкой термоусаживаемых изделий

### Электронный пучок

Дозиметрические пленки СО ПД(Э)-1/10

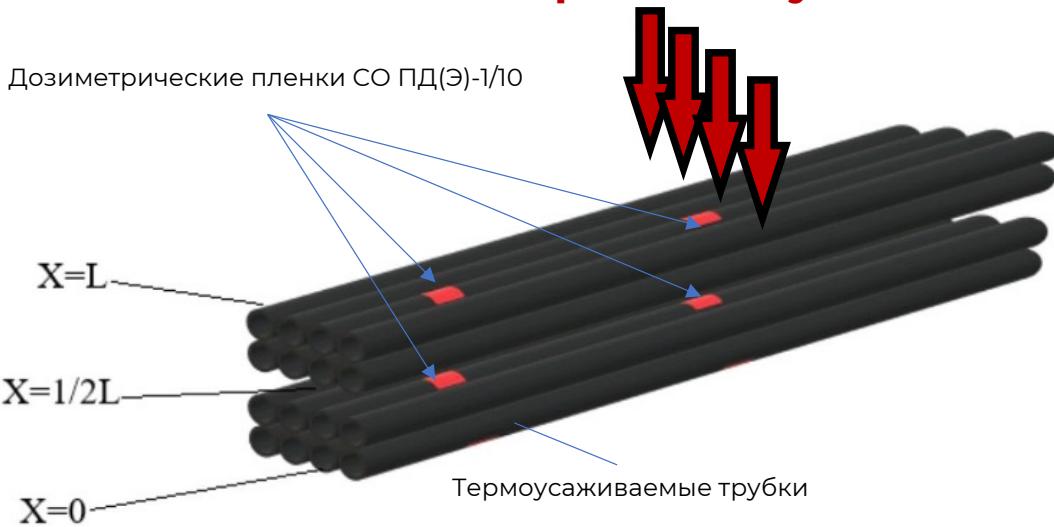


Схема эксперимента по радиационной обработке термоусаживаемых трубок ТУТ 35Х3,5х1340 в бруске 4х4.

Трубы каждой позиции были сформированы в бруски. Дозиметры

Устанавливались в трех позициях:

- X=L, вход пучка излучения - поверхность верхнего ряда трубок, в двух местах (центр и край)
- X=1/2L, середина бруска, в двух местах (центр и край)
- X=0, выход пучка излучения, нижний ряд трубок, в двух местах (центр и край).

- Ускоритель Mevex, энергия пучка 10 МэВ (Центр Axenter, г. Дубна)
- Радиохромные пленочные дозиметры GEX WinDose EA
- Спектрофотометр ПЭ -5400 УФ

### Параметры трубок

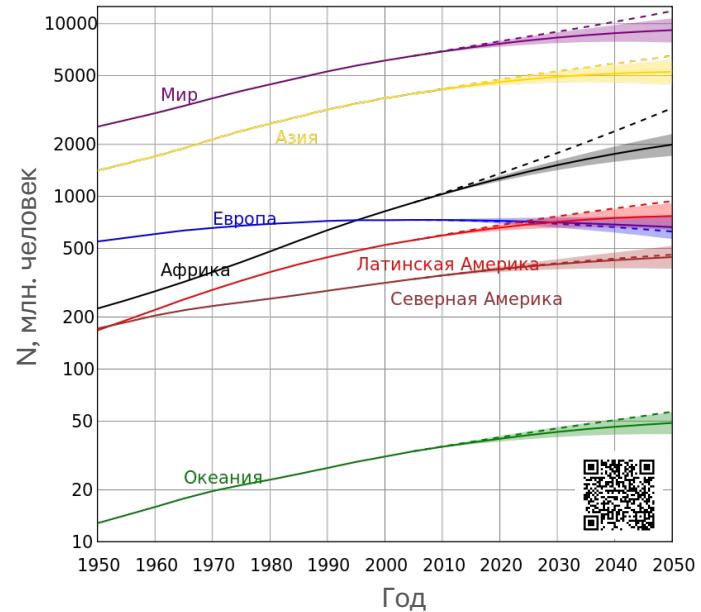
Внешний радиус, мм	35
Внутренний радиус, мм	31.5
Длина, мм	1340

# Актуальность технологии радиационной обработки

По данным ФАО ООН ежегодно в мире пропадает примерно треть всех произведенных продуктов питания (1,3 млрд. тонн)<sup>1</sup>



Прогноз численности мирового населения до 2050 года<sup>2</sup>



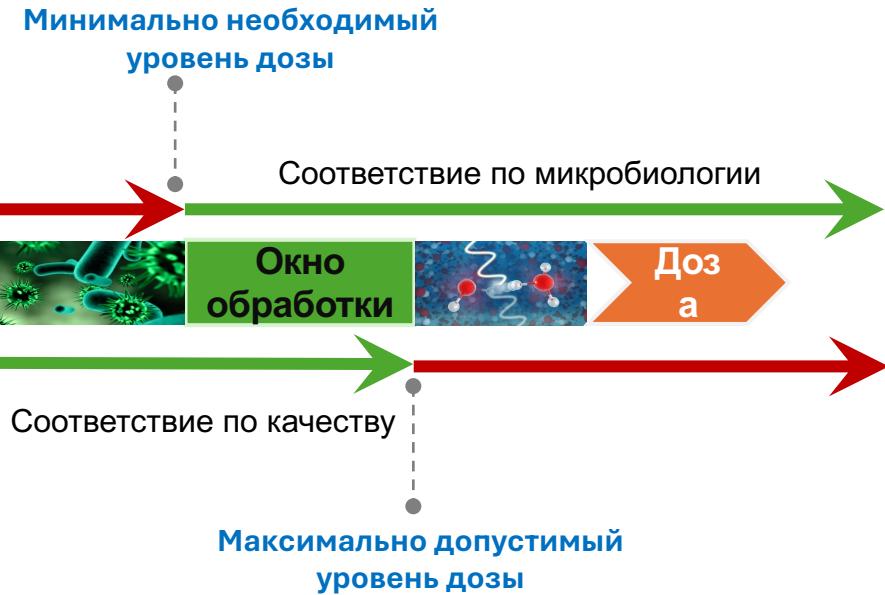
<sup>1</sup> ФАО. 2019. Положение дел в области продовольствия и сельского хозяйства. Курс на сокращение потерь и порчи продовольствия. Рим <https://www.fao.org/3/ca6030ru/ca6030ru.pdf>

<sup>2</sup> Демографические изменения. Организация объединенных наций, 2019. <https://www.un.org/ru/un75/shifting-demographics> [https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019\\_Volume-I\\_Comprehensive-Tables.pdf](https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_Volume-I_Comprehensive-Tables.pdf) [https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019\\_HIGHLIGHTS.pdf](https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_HIGHLIGHTS.pdf)

# Преимущества и ограничения радиационной обработки

## Преимущества обработки

-  Сохранение вкуса, аромата и полезных свойств при отсутствии нагрева и химии
-  Высокая проникающая способность и отсутствие остаточного проникающего агента
-  Возможность обработки в упаковке, что исключает повторное загрязнение
-  Высокая скорость и большие объемы обработки
-  ПРОДУКЦИЯ ОСТАЕТСЯ БЕЗОПАСНОЙ  
Ионизирующее излучение разрывает химические связи вредных микроорганизмов и не оставляет никаких остаточных следов



**НЕОБХОДИМО ТЩАТЕЛЬНО  
ПЛАНИРОВАТЬ ОБЛУЧЕНИЕ!!!**

# Преимущества радиационной обработки

## Преимущества обработки



Сохранение вкуса, аромата и полезных свойств при отсутствии нагрева и химии



Высокая проникающая способность и отсутствие остаточного проникающего агента



Возможность обработки в упаковке, что исключает повторное загрязнение



Высокая скорость и большие объемы обработки



### ПРОДУКЦИЯ ОСТАЕТСЯ БЕЗОПАСНОЙ

Ионизирующее излучение разрывает химические связи вредных микроорганизмов и не оставляет никаких остаточных следов



### Спектр решаемых задач:

Увеличение сроков хранения пищевой продукции животного и растительного происхождения



Предотвращение прорастания корне- и клубнеплодов при длительном хранении



Замедление созревания свежих фруктов и овощей до коммерческой реализации



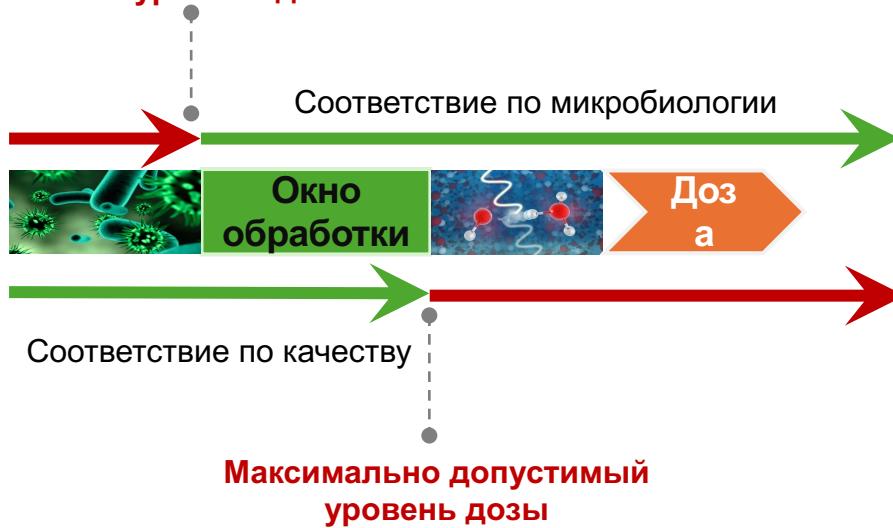
Дезинсекцию (например, зерна) после сбора урожая



Стимулирование роста и развития посевного материала, повышение урожайности

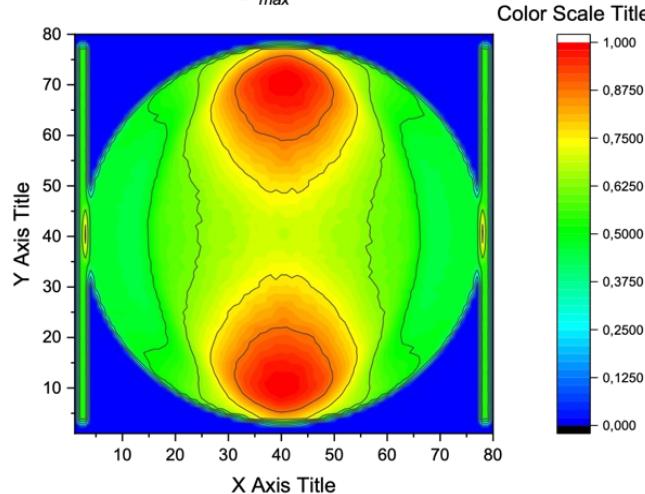
# Дозиметрическое планирование радиационной обработки

Минимально необходимый  
уровень дозы



**ВАЖНО соблюдать равномерность  
распределения дозы по объёму  
объекта!**

$$\frac{D_{min}}{D_{max}} = 30 \%$$



Для пищевой продукции определены довольно узкие диапазоны рабочих доз<sup>1</sup>, вдобавок **необходимо обеспечивать однородность облучения не менее 80%<sup>2</sup>.**

<sup>1</sup> Chernyaev A.P. et al. // J. Physics of Atomic Nuclei. - 2018. - Vol. 81, N 11. - P. 1656-1659.

<sup>2</sup> Черняев А.П., Авдохина В.М., Близнюк У.А. и др. //Известия РАН, серия физическая. 2020. Т. 84. № 4. С. 501–507.

# Радиационная обработка в России и мире

Страны-лидеры по числу центров антимикробной и фитосанитарной обработки ионизирующим излучением (по данным МАГАТЭ, 2018)

Китай: 140 гамма установок,  
400 ускорителей электронов (72 центра -10 МэВ)

США:~39

Индия: ~9

Германия: ~5

Франция: ~5

ЮАР: ~4

Бразилия: ~3

Индонезия: ~3

Украина: ~3

Мексика: ~2

Чили: ~2

Испания: ~2

Бельгия: ~2

Бангладеш: ~2

Тайланд: ~2

Вьетнам: ~2



Россия: 1, а также центры в Англии, Японии, Канаде, Аргентине, Уругвае, Малайзии, Кореи, Австрии, Австралии, Чехии, Франции, Нидерландах, Польше и др.)

Эффект	Доза
Радиационная модификация полимеров (сшивка, прививка, изменение свойств)	50–200 кГр
Стерилизация медицинских изделий	25 кГр
Стерилизация костных имплантов / костного материала	15–35 кГр
Стерилизация / деконтаминация косметики	5–15 кГр
Повышение урожайности растений (радиационная стимуляция)	≈1–100 Гр
Обработка посевного материала (стимуляция семян)	20–100 Гр
Обработка посевного материала (мутационная селекция)	100–400 Гр
Продление сроков годности пищевой продукции	0.05–3 кГр