



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В. ЛОМОНОСОВА



Студеникин Феликс Рикардович

м.н.с. лаборатории пучковых технологий и медицинской физики НИИЯФ МГУ,  
аспирант кафедры физики ускорителей и радиационной медицины физического факультета МГУ

## **МОДИФИКАЦИЯ ПУЧКА УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РАВНОМЕРНОСТИ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ОБЛУЧАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ**

1.3.18 (01.04.20) – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

научные руководители:  
доктор физико-математических наук,  
профессор А.П. Черняев

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник У.А. Близнюк

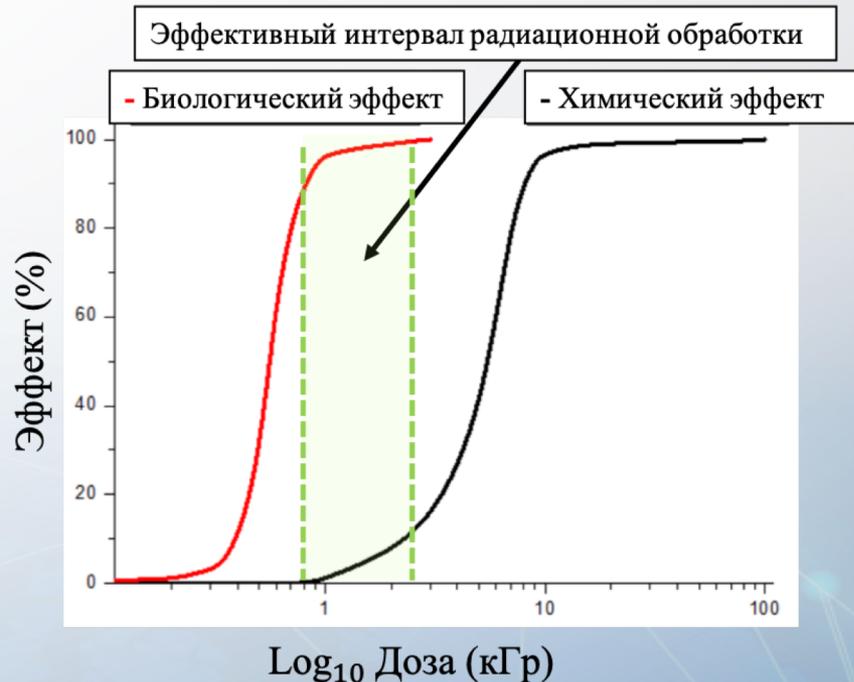
# Радиационная обработка продуктов питания и медицинских изделий

Для радиационной обработки продуктов питания (ISO 14470) и медицинских изделий применяют (ISO 11137):

- Электронное излучение с энергией не более 10 МэВ;
- Тормозное излучение, генерируемое ускорителями с энергией не более 5 МэВ;
- Гамма-излучение  $^{60}\text{Co}$  ( $T_{1/2} = 5.27$  года,  $E = 1.25$  МэВ) и  $^{137}\text{Cs}$  ( $T_{1/2} = 30.17$  года,  $E = 0.66$  МэВ).

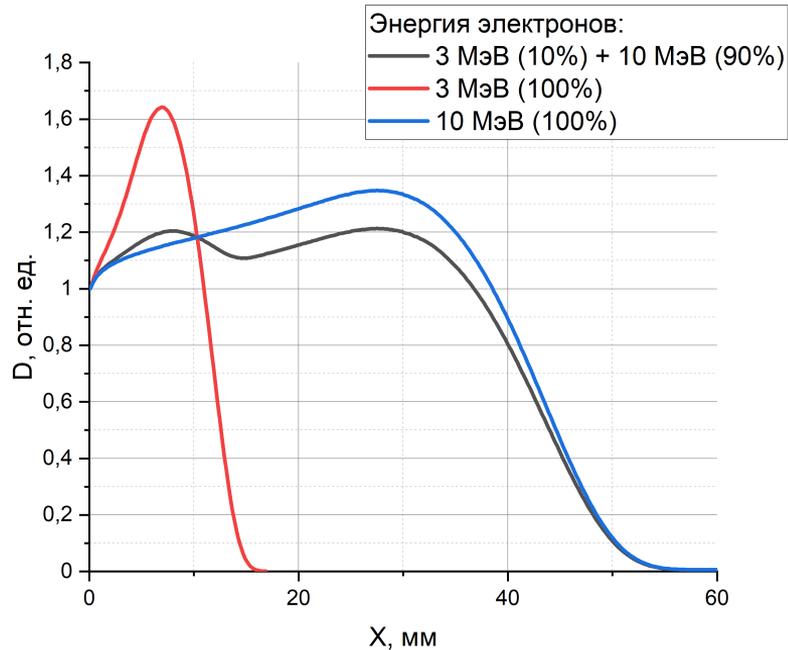
Цели обработки	Предельные дозы (кГр)	Объекты обработки
Задержка прорастания	0.05-0.15	Картофель, лук, корнеплоды и тд.
Дезинсекция (уничтожение насекомых)	0.15-0.5	Зерновые, сушеные овощи и фрукты
Замедление процессов созревания	0.5-3.0	Свежие овощи и фрукты
Удлинение сроков хранения	1.0-3.0	Ягоды, фрукты, овощи
Подавление развития патогенных микроорганизмов	1.0-7.0	Свежее сырье, мясо, птица, рыба и полуфабрикаты
Деконтаминация добавок и ингредиентов	10-30	Специи, ферментные препараты и тд.
Радиационная стерилизация	15-25	Медицинские изделия

- Плотность объектов: от 0.3 г/см<sup>3</sup> до 1.6 г/см<sup>3</sup>
- атомный номер элементов преимущественно от 1 до 53.
- Обработка в коробках или контейнерах от 10 см × 20 см × 30 см до 40 см × 40 см × 80 см.



# Причины неоднородности радиационной обработки ускоренными электронами

- 1) нелинейное распределение дозы по глубине объекта;
- 2) неоднородность плотности и химического состава вещества объекта;
- 3) сложная геометрия объектов облучения;
- 4) неоднородное распределение объектов в упаковке.



*Trends in radiation sterilization of health care products.*  
— Vienna : International Atomic Energy Agency, 2008.

*Зависимость поглощенной дозы  $D$  в слоях объекта из воды в форме параллелепипеда от глубины  $X$  при обработке электронами с энергией 3 МэВ и 10 МэВ.*

# Цель и задачи

## Цель работы:

Увеличение равномерности распределения поглощенной дозы по объему объектов при радиационной обработке электронами путем применения пластин-модификаторов пучка.

## Задачи:

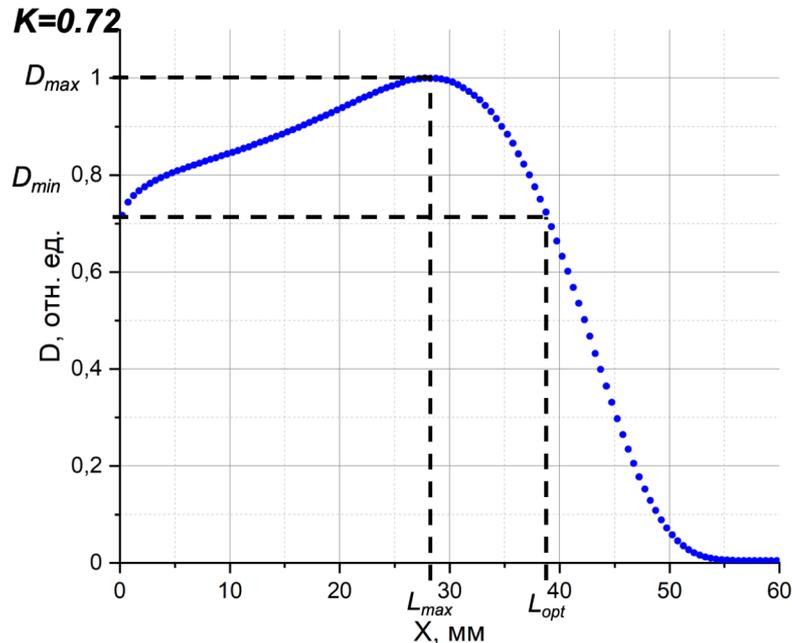
1. Разработать метод увеличения однородности облучения объектов при обработке электронами с использованием пластин-модификаторов.
2. Исследовать влияние материала и толщины пластин-модификаторов на энергетический спектр пучков с начальной энергией электронов от 4 МэВ до 10 МэВ и характеристики распределения поглощенной дозы в облучаемых объектах.
3. Получить аналитические выражения для расчета распределения поглощенной дозы по глубине объекта и спектра пучка электронов после прохождения пластин-модификаторов.
4. Провести экспериментальную проверку возможности использования пластин-модификаторов для увеличения равномерности распределения поглощенной дозы по глубине облучаемого объекта при обработке ускоренными электронами.

# Основные положения, выносимые на защиту

1. Метод модификации спектра пучка при радиационной обработке ускоренными электронами позволяет увеличить равномерность распределения поглощенной дозы по объёму облучаемого объекта. Повышение однородности облучения достигается за счет увеличения доли электронов с энергиями, меньшими, чем максимальная энергия первичного пучка.
2. Облучение объектов ускоренными электронами с начальной энергией от 4 МэВ до 10 МэВ при дополнительном размещении алюминиевых пластин-модификаторов толщиной от 0.5 мм до 5 мм позволяет увеличить равномерность распределения поглощенной дозы до 97 % в зависимости от физических характеристик объекта, при этом для объектов в форме параллелепипеда достигается наибольшая однородность облучения.
3. Разработанный математический алгоритм позволяет без проведения компьютерного моделирования при известных параметрах облучения объектов ускоренными электронами с энергией до 10 МэВ рассчитать с заданной точностью спектр пучка после прохождения через алюминиевую пластину-модификатор заданной толщины и распределение поглощенной дозы по глубине объекта.

# Материалы и методы

## Исследуемые характеристики распределения поглощенной дозы



Зависимость поглощенной дозы  $D$  (отн. ед.) от глубины  $X$  (мм) при обработке электронами с энергией 10 МэВ объекта из воды в форме параллелепипеда.

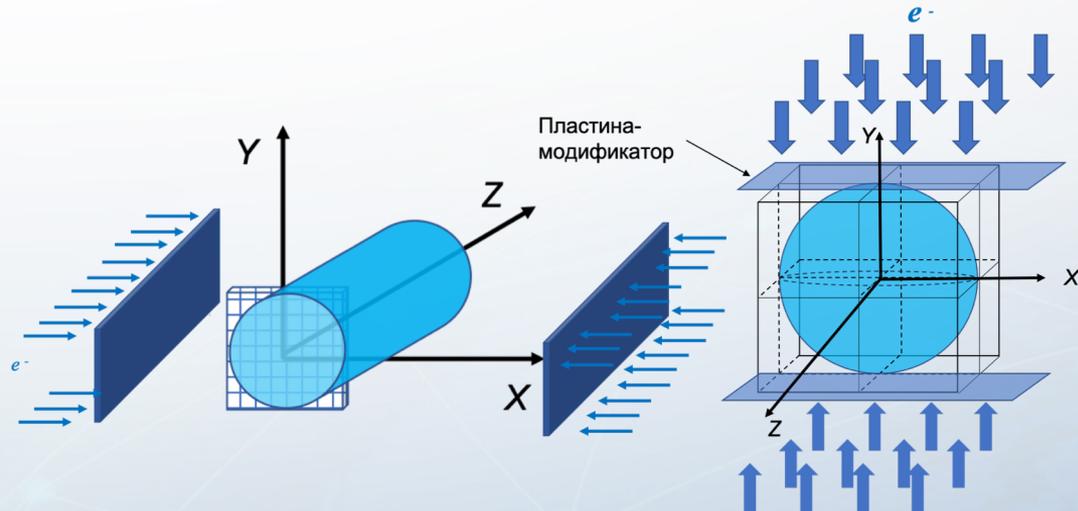
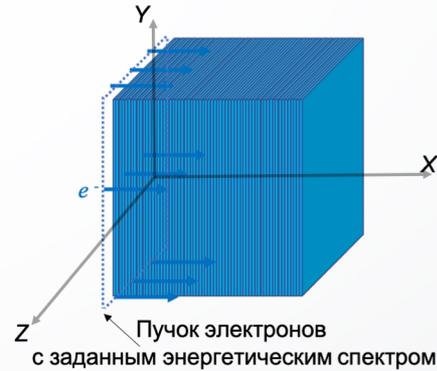
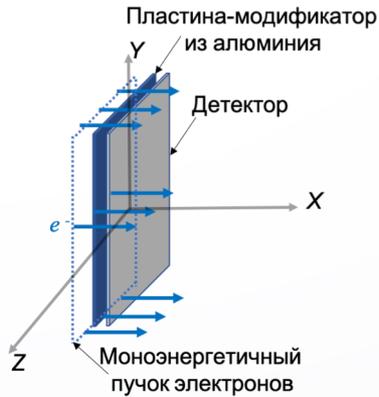
$K = \frac{D_{min}}{D_{max}}$  – коэффициент однородности облучения;

$L_{max}$  – глубина объекта, на которой значение поглощенной дозы максимально;

$L_{opt}$  – оптимальная толщина облучаемого объекта, равная глубине, на которой значение поглощенной дозы совпадает с соответствующим значением поверхностной дозы.

# Материалы и методы

## Численные эксперименты с использованием метода Монте-Карло



### Физическая модель:

- Область энергий: от 10 эВ до 10 МэВ;
- частицы: электроны, фотоны, позитроны;
- физические процессы: ионизационные потери, потери на тормозное излучение, упругие столкновения, комптоновское рассеяние, образование электрон-позитронных пар в поле ядра и атомных электронов, фотоядерные реакции, процессы аннигиляции.

### Параметры моделирования:

- Количество электронов в пучке от  $10^6$  до  $10^9$ , энергия от 4 МэВ до 10 МэВ с шагом 0.5 МэВ;
- плотность облучаемых объектов от 0.3 г/см<sup>3</sup> до 1.6 г/см<sup>3</sup> с шагом 0.1 г/см<sup>3</sup>;
- размеры объектов: куб с линейными размерами 31 см × 31 см × 31 см, цилиндр с диаметром 7 см, шар с диаметром 4.6 см;
- пластины-модификаторы из алюминия, железа, меди толщиной от 0.5 мм до 5 мм;

# Материалы и методы

## Экспериментальная проверка возможности применения пластин-модификаторов

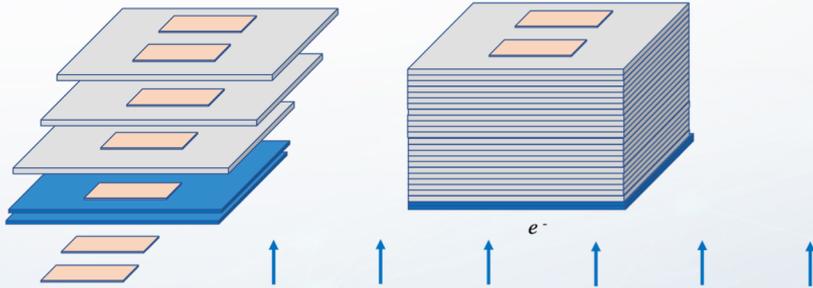


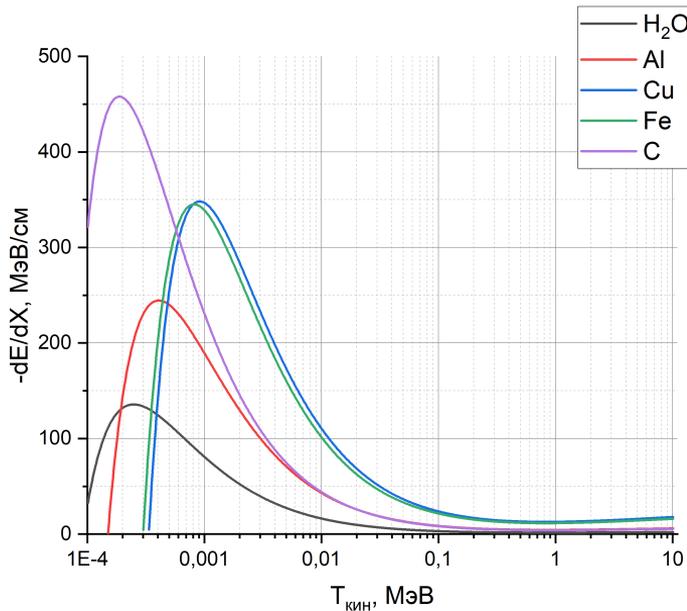
Схема облучения сборного фантома из 23 пластин из PETG-пластика толщиной 2,5 мм и 2 пластин-модификаторов из алюминия толщиной 1 мм пучком ускоренных электронов с эффективной энергией обработки 9,5 МэВ.

### Материалы и методы исследования:

- Ускоритель **УЭЛР-10-15-С**, энергия пучка 9.5 МэВ (центр Теклеор, г. Обнинск);
- ускоритель **ИЛУ-14**, энергия пучка 10 МэВ (ФГБУ ГНЦ ФМБЦ имени А.И. Бурназяна, г. Москва)
- изготовленные из алюминия пластины-модификаторы толщиной от 1 мм до 5 мм;
- пластины из пластика PETG (полиэтилентерефталат гликоль, плотность материала 1,4 г/см<sup>3</sup>) изготовленные по технологии 3D-печати.
- дозиметрические пленки государственного стандартного образца СО ПД(Э)-1/10 и СО ПД(Ф)Э-5/50, погрешность определения поглощенной дозы 5%;
- спектрофотометр ПЭ-5400ВИ.

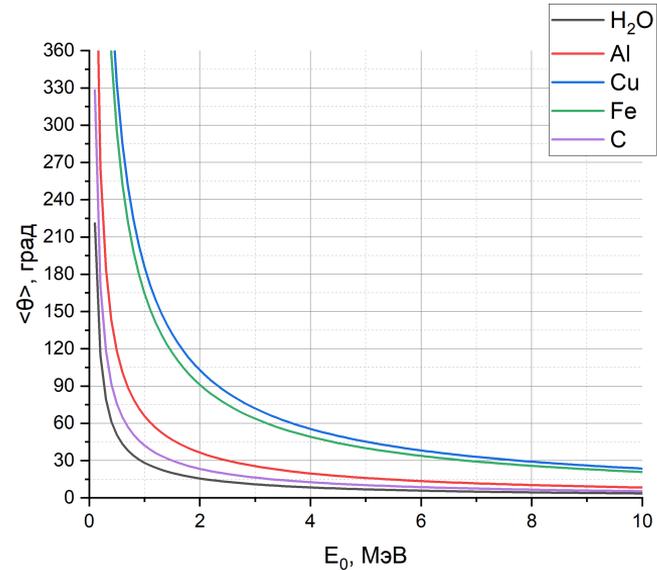
# Выбор материала пластин-модификаторов

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ион.}} = -\frac{2\pi}{\beta^2} n_e r_0^2 m_e c^2 \left[ \ln \left( \frac{m_e c^2 T_e}{\bar{I}^2} \frac{\beta^2}{2(1-\beta^2)} \right) - (2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) \ln 2 + 1 - \beta^2 \right]$$



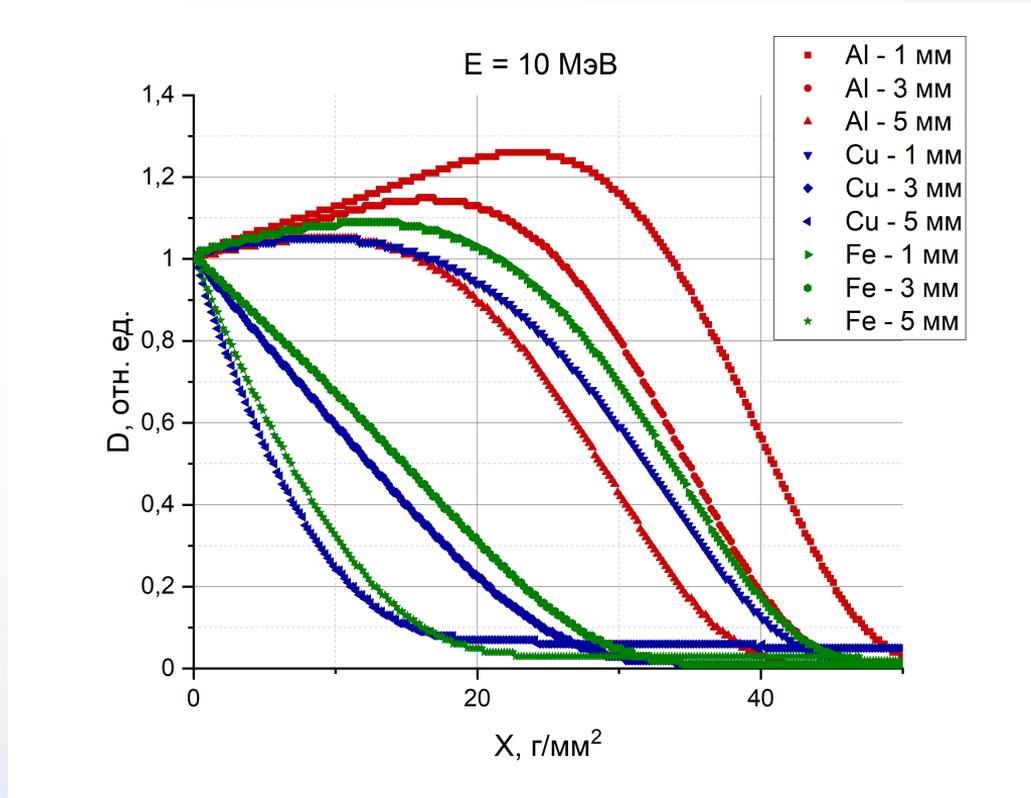
Зависимость средних ионизационных потерь электронов от кинетической энергии в воде, алюминии, меди, железе и углероде.

$$\langle \theta^2 \rangle = 0.157 \frac{Z(Z+1)}{A} \frac{z^2 x}{(pv)^2} \ln \left( 1.13 \cdot 10^4 \frac{Z^{4/3} z^2 x}{A \beta^2} \right)$$



Зависимость среднего угла отклонения электронов от начальной энергии пучка электронов при прохождении 1 мм в воде, алюминии, меди, железе и углероде.

# Распределения поглощенной дозы в объектах при облучении с добавлением пластин-модификаторов из алюминия, меди, железа



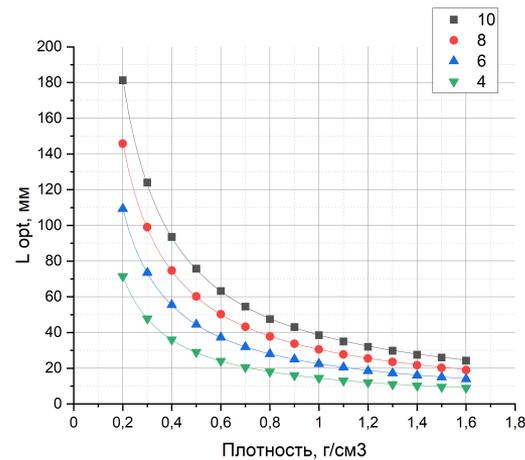
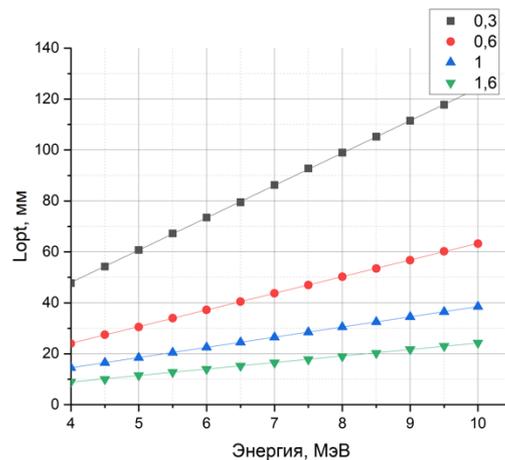
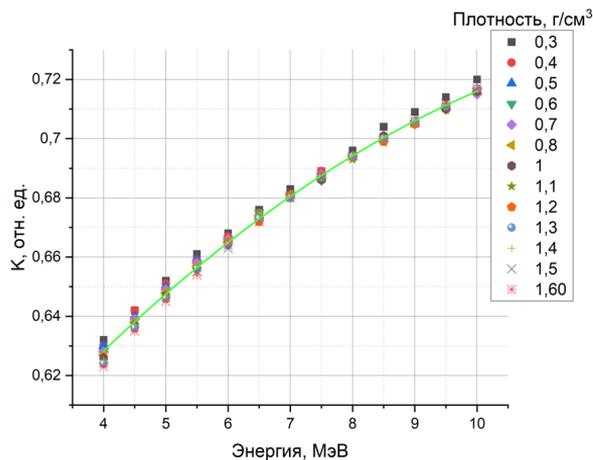
Зависимость значений поглощенной дозы  $D$  в слоях объекта от глубины  $X$  при обработке моноэнергетическим пучком электронов с энергией 10 МэВ при добавлении пластин-модификаторов из алюминия, меди и железа толщиной 1, 3, 5 мм.

# Оценка однородности облучения ускоренными электронами

$$K = 0.01 [\text{МэВ}^{-1}] \times E [\text{МэВ}] + 0.57$$

$$L_{opt} [\text{см}] = 4 \left[ \frac{\text{см}^4}{\text{МэВ} \cdot \text{г}} \right] \times \rho^{-0.96} \left[ \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right] \times E [\text{МэВ}] - 1.59 \left[ \frac{\text{см}^4}{\text{г}} \right] \times \rho^{-0.46} \left[ \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right]$$

$$L_{max} [\text{см}] = 3.04 \left[ \frac{\text{см}^4}{\text{МэВ} \cdot \text{г}} \right] \times \rho^{-0.97} \left[ \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right] \times E [\text{МэВ}] - 2.89 \left[ \frac{\text{см}^4}{\text{г}} \right] \times \rho^{-0.81} \left[ \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right]$$



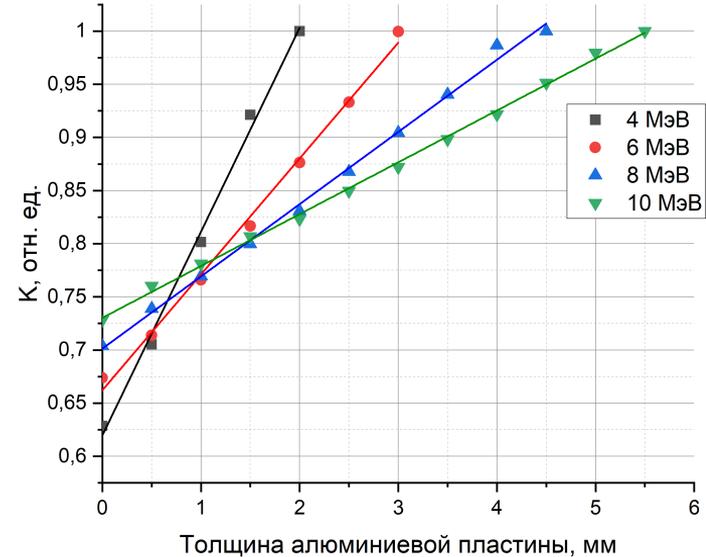
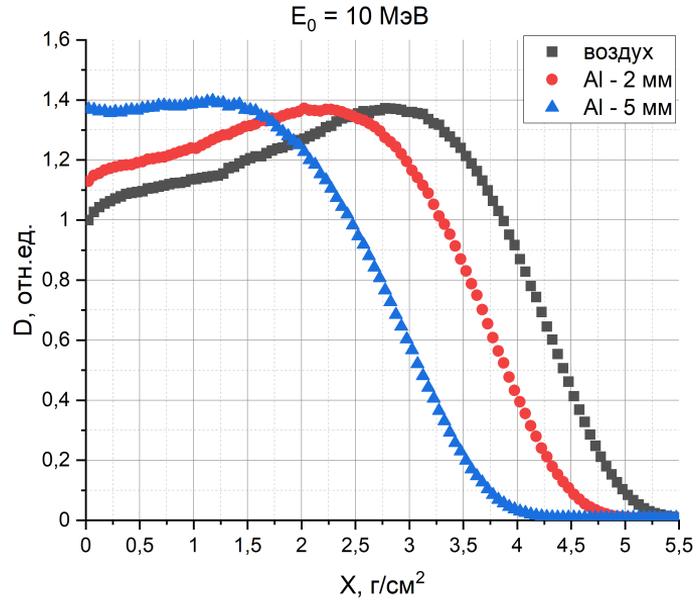
Зависимость значений коэффициента  $K$  от энергии  $E$  ускоренных электронов для объекта в форме параллелепипеда с плотностью от  $0.3 \text{ г/см}^3$  до  $1.6 \text{ г/см}^3$ .

Зависимость значений  $L_{opt}$  от энергии ускоренных электронов для объекта в форме параллелепипеда с плотностью  $0.3 \text{ г/см}^3$ ,  $0.6 \text{ г/см}^3$ ,  $1 \text{ г/см}^3$ ,  $1.6 \text{ г/см}^3$

Зависимость значений  $L_{max}$  и  $L_{opt}$  от плотности параллелепипеда при облучении ускоренными электронами с энергией  $4 \text{ МэВ}$ ,  $6 \text{ МэВ}$ ,  $8 \text{ МэВ}$ ,  $10 \text{ МэВ}$

# Распределения поглощенной дозы по глубине объектов при облучении с добавлением пластин-модификаторов

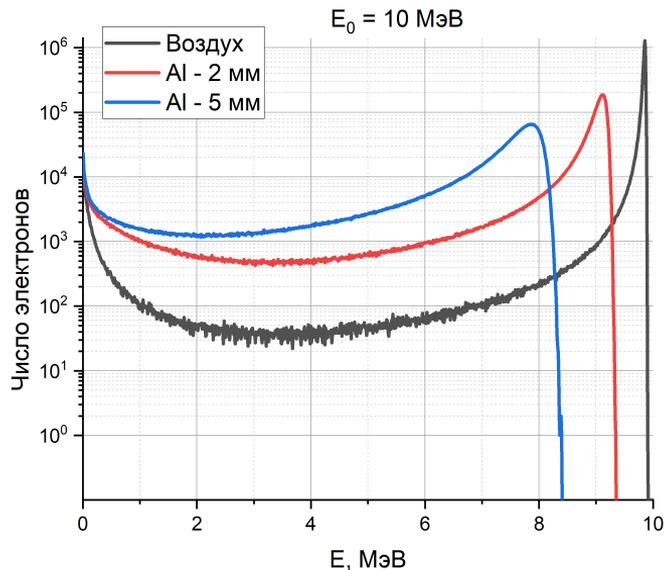
$$K = K_0 + b * d$$



Зависимость значений поглощенной дозы  $D$  (отн. ед.) в слоях куба, состоящего из воды, размером 30 см x 30 см x 30 см от глубины  $X$  при обработке моноэнергетическими пучками электронов с энергией 10 МэВ без размещения пластин-модификаторов и с добавлением пластин-модификаторов из алюминия толщиной  $d$  (мм).

Зависимость значений коэффициента  $K$  (отн. ед.) от толщины  $d$  (мм) алюминиевой пластины-модификатора при облучении куба моноэнергетическими пучками электронов с энергией 4 МэВ, 6 МэВ, 8 МэВ, 10 МэВ.

# Спектры энергии пучка электронов после прохождения пластин-модификаторов из алюминия



$E_0$ , МэВ	$d$ , мм	$L_{opt,d}$ , г/см <sup>2</sup>	$K_0$ , отн. ед.	$K_d$ , отн. ед.	Доля электронов с энергией от 0 МэВ до 3 МэВ, %
10	0.0	$3.875 \pm 0.025$	$0.73 \pm 0.01$	-	$1.78 \pm 0.04$
	2.0	$3.125 \pm 0.025$	$0.73 \pm 0.01$	<b><math>0.81 \pm 0.02</math></b>	$5.94 \pm 0.12$
	4.0	$2.225 \pm 0.025$	$0.76 \pm 0.02$	<b><math>0.91 \pm 0.02</math></b>	$7.87 \pm 0.16$
	5.0	$1.575 \pm 0.025$	$0.82 \pm 0.02$	<b><math>0.97 \pm 0.02</math></b>	$8.93 \pm 0.18$

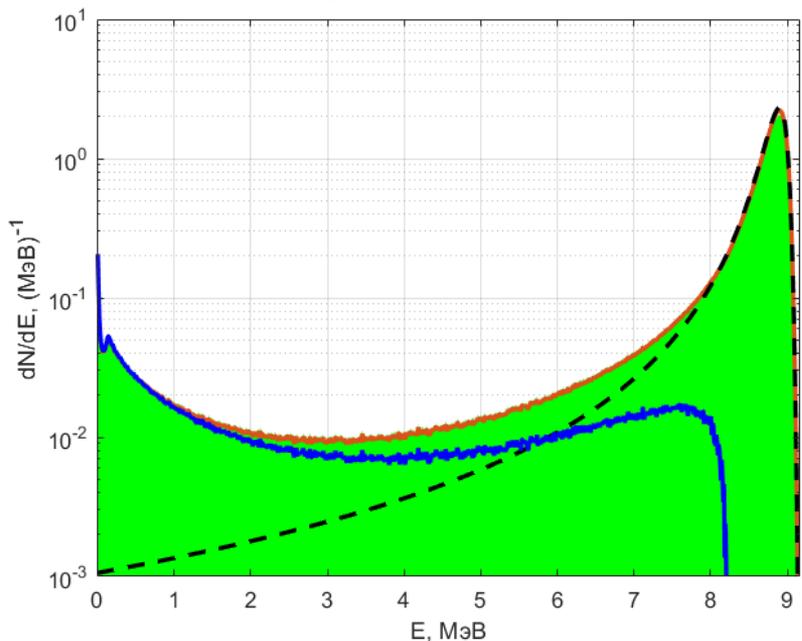
Спектры энергии пучков электронов после прохождения через воздух толщиной 4 см и через алюминиевые пластины-модификаторы толщиной 2 и 5 мм электронов с начальной энергией 10 МэВ.

Значения характеристик дозовых распределений и доли энергии электронов с энергией от 0 МэВ до 3 МэВ после прохождения пластин-модификаторов

# Расчет энергетических спектров пучка электронов после пластины-модификатора

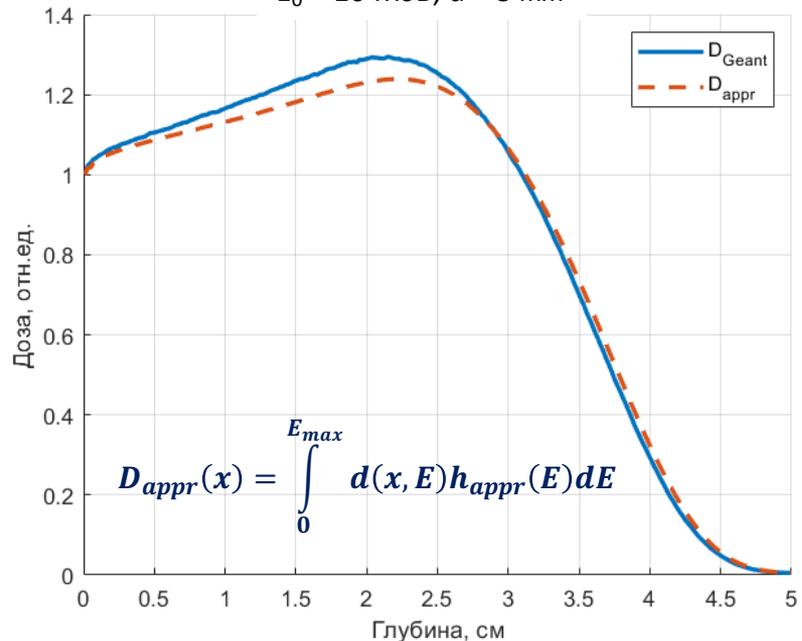
$$h_{appr}(E, E_0, d) = \text{Landau}(E_0 - E, \Delta E_{appr}(E_0, d), b_{appr}(E_0, d)) + v_{appr}(E, E_0, d)$$

$E_0 = 10$  МэВ,  $d = 3$  мм



Энергетический спектр электронов после прохождения пластины-модификаторов – зеленая гистограмма. Черная пунктирная линия – распределение Ландау с учетом рассчитанных параметров  $\Delta E_{appr}$  и  $b_{appr}$ ; синяя линия – функция  $v_{appr}$ ; красная линия – суммарный спектр  $h_{appr}$ .

$E_0 = 10$  МэВ,  $d = 3$  мм

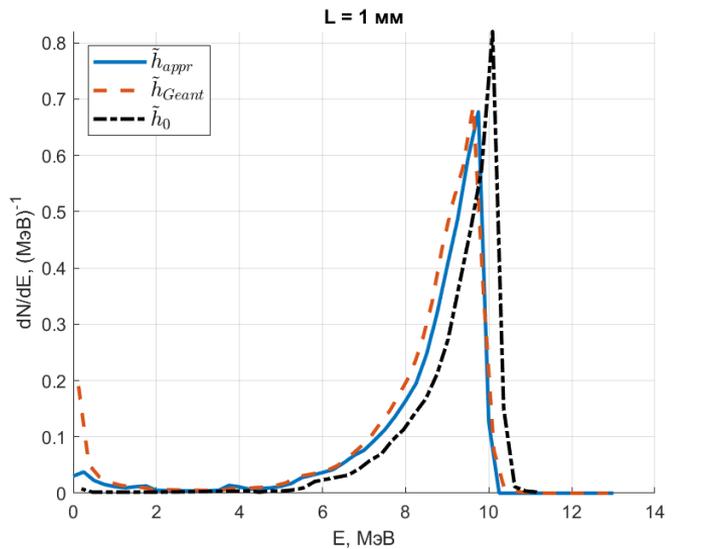


Распределения поглощенной дозы по глубине объекта, полученные путем компьютерного моделирования ( $D_{geant}$ ) и с использованием аналитической зависимости ( $D_{appr}$ ).

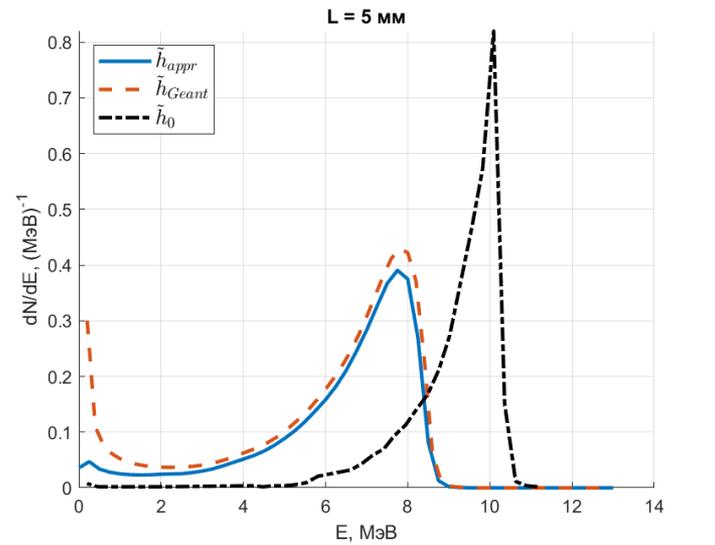
# Расчет энергетических спектров пучка от ускорителя электронов после прохождения через пластину-модификатор

$$\tilde{h}_{appr}(E) = \int_0^{E_{max}} h_{appr}(E, E_0, d) \tilde{h}_0(E_0) dE_0$$

а)



б)

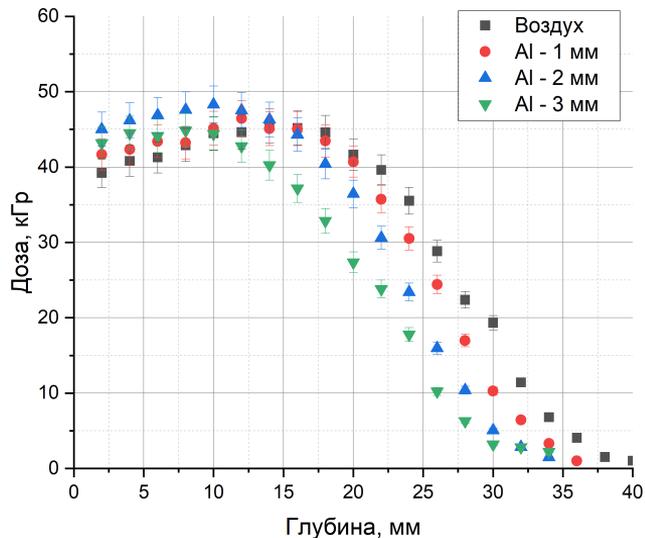


Распределения плотности вероятности по энергии для начального энергетического спектра  $\tilde{h}_0$  ускорителя (черная пунктирная линия) и спектров после прохождения пластин-модификаторов толщиной **а)**  $d = 1 \text{ мм}$  и **б)**  $d = 5 \text{ мм}$  (синяя сплошная линия  $\tilde{h}_{Geant}$  – спектр, рассчитанный путем компьютерного моделирования, оранжевая пунктирная линия  $\tilde{h}_{appr}$  – спектр, полученный с использованием аналитической зависимости).

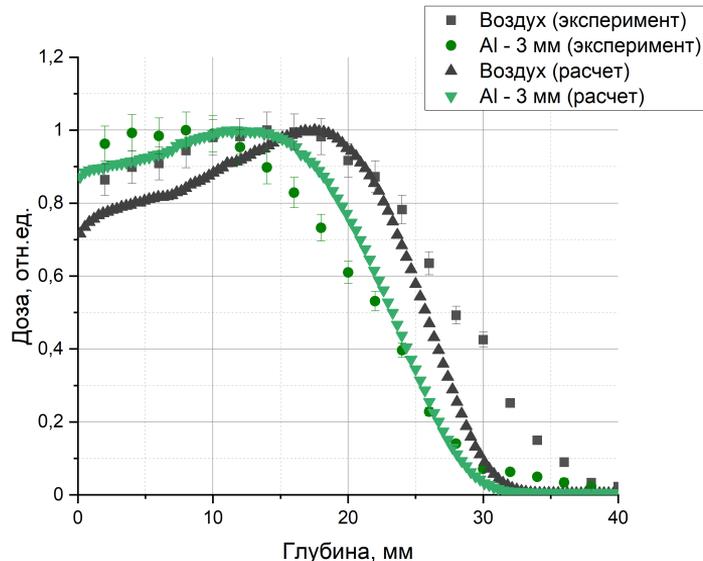
# Результаты экспериментальной проверки метода

Ускоритель электронов УЭЛР 10-15 С

$$K_{d=3, \text{эксп}} = 0.96 \pm 0.04 \quad K_{d=3, \text{расчет}} = 0.89 \pm 0.02$$



Зависимость значений поглощенной дозы  $D$  (Гр) от глубины (мм) в слоях фантома из пластика PET-G при обработке пучком электронов с максимальной энергией 9.5 МэВ с размещением пластин-модификаторов толщнами 1 мм, 2 мм и 3 мм и без них.



Сравнение экспериментальных и расчетных значений дозу  $D$  (отн. ед.) от глубины (мм) в слоях фантома из пластика PET-G при обработке пучком электронов с максимальной энергией 9.5 МэВ с размещением пластин-модификаторов толщиной 3 мм.

# Результаты экспериментальной проверки метода

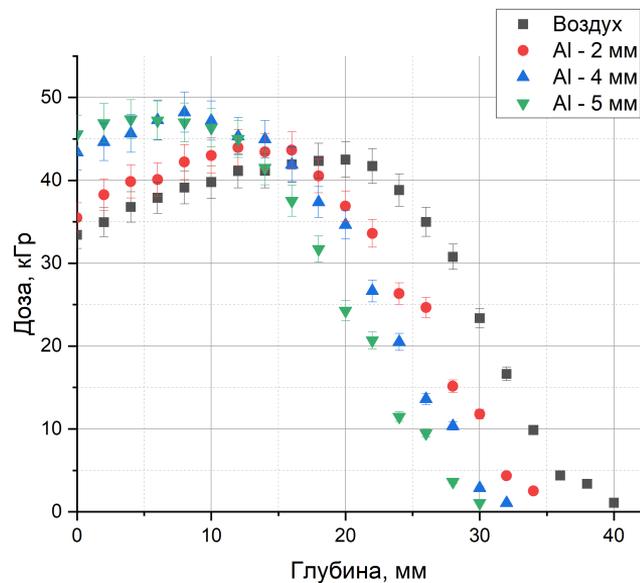
Значения параметров  $K$ ,  $L_{max}$  и  $L_{opt}$ . (ускоритель электронов УЭЛР 10–15 С)

УЭЛР 10-15 С			
Схема облучения	$K(L_{opt})$ , отн.ед.	$L_{max}$ , мм	$L_{opt}$ , мм
Без пластины-модификатора	$0.86 \pm 0.04$	$14 \pm 2$	$22 \pm 2$
С пластиной толщиной 1 мм	$0.89 \pm 0.04$	$12 \pm 2$	$20 \pm 2$
С пластиной толщиной 2 мм	$0.93 \pm 0.04$	$10 \pm 2$	$16 \pm 2$
С пластиной толщиной 3 мм	$0.96 \pm 0.04$	$8 \pm 2$	$12 \pm 2$

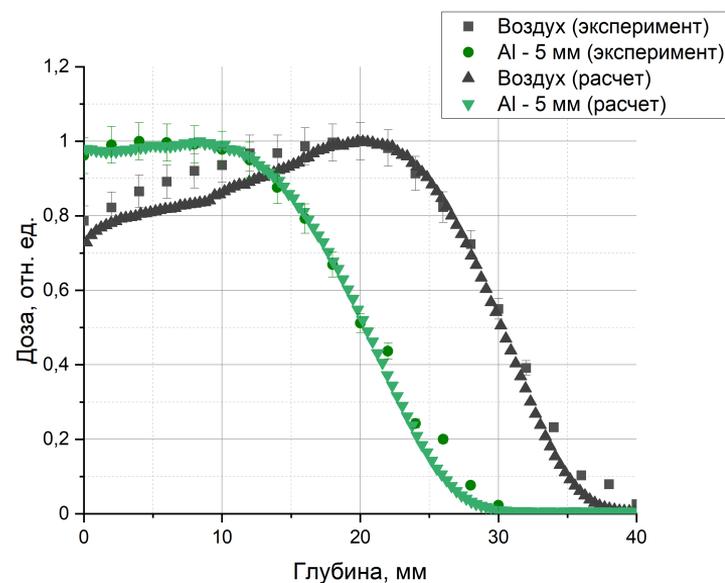
# Результаты экспериментальной проверки метода

Ускоритель электронов ИЛУ-14

$$K_{d=5, \text{эксп}} = 0.97 \pm 0.04 \quad K_{d=5, \text{расчет}} = 0.97 \pm 0.02$$



Зависимость значений поглощенной дозы  $D$  (Гр) от глубины (мм) в слоях фантома из пластика PET-G при обработке пучком электронов с энергией 10 МэВ с размещением пластин-модификаторов толщинами 2 мм, 4 мм и 5 мм и без них (ИЛУ-14).



Сравнение экспериментальных и расчетных значений поглощенной дозы  $D$  (отн. ед.) от глубины (мм) в слоях фантома из пластика PET-G при обработке пучком электронов с максимальной энергией 10 МэВ с размещением пластин-модификаторов толщиной 5 мм.

# Результаты экспериментальной проверки метода

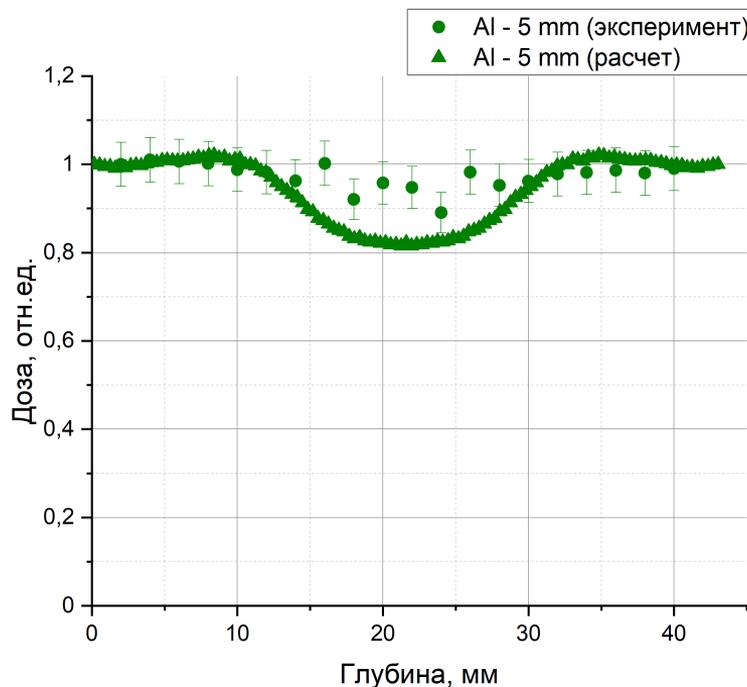
Значения параметров  $K$ ,  $L_{max}$  и  $L_{opt}$  (ускоритель электронов ИЛУ-14)

ИЛУ-14			
Схема облучения	$K(L_{opt})$ , отн.ед.	$L_{max}$ , мм	$L_{opt}$ , мм
Без пластины-модификатора	$0.82 \pm 0.04$	$20 \pm 2$	$26 \pm 2$
С пластиной толщиной 2 мм	$0.83 \pm 0.04$	$12 \pm 2$	$20 \pm 2$
С пластиной толщиной 4 мм	$0.92 \pm 0.04$	$8 \pm 2$	$14 \pm 2$
С пластиной толщиной 5 мм	$0.97 \pm 0.04$	$4 \pm 2$	$10 \pm 2$

# Результаты экспериментальной проверки метода

Облучение фантома толщиной 4 см с двух сторон на ускорителе ИЛУ-14

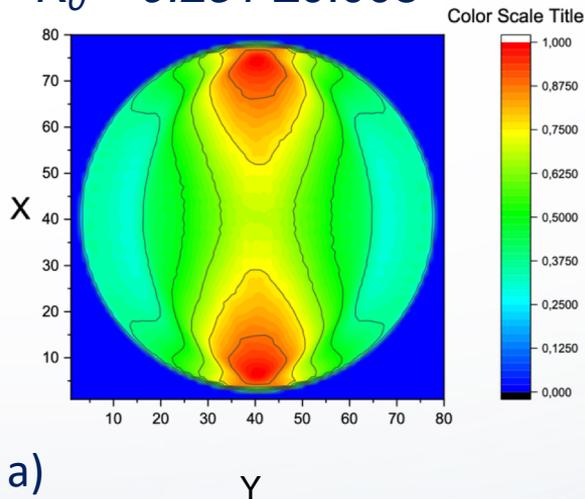
$$K_{d=5, \text{эксп}} = 0.91 \pm 0.04 \quad K_{d=5, \text{расчет}} = 0.89 \pm 0.02$$



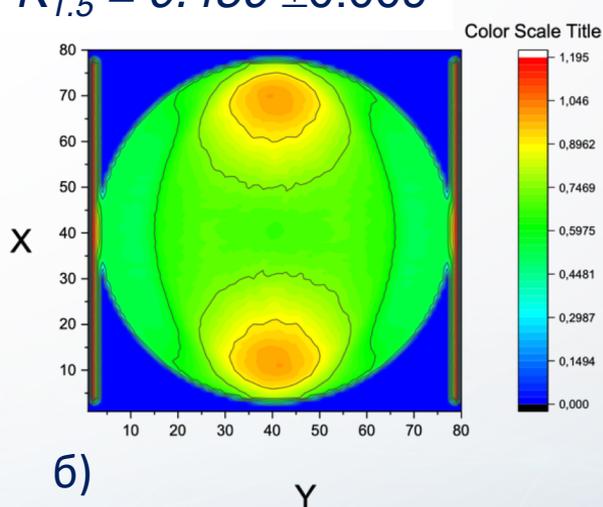
Зависимость значений поглощенной дозы  $D$  (отн. ед.) от глубины (мм) в слоях фантома из пластика PET-G при двусторонней обработке пучком электронов с энергией 10 МэВ с размещением алюминиевых пластинок-модификаторов 5 мм.

# Применение пластин-модификаторов для повышения однородности радиационной обработки объектов в форме цилиндра

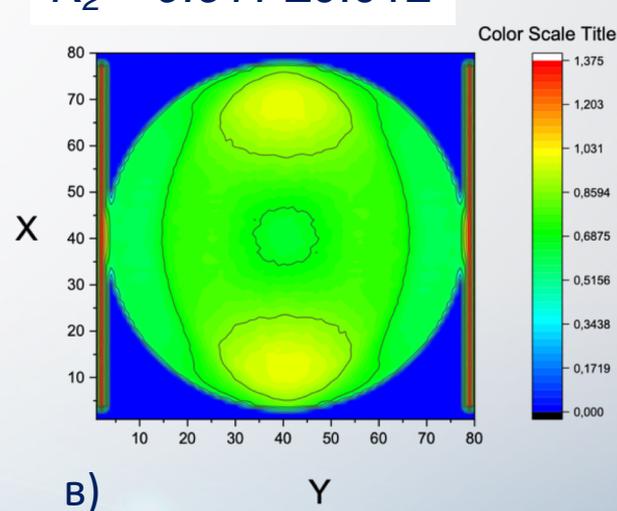
$$K_0 = 0.251 \pm 0.005$$



$$K_{1.5} = 0.450 \pm 0.009$$

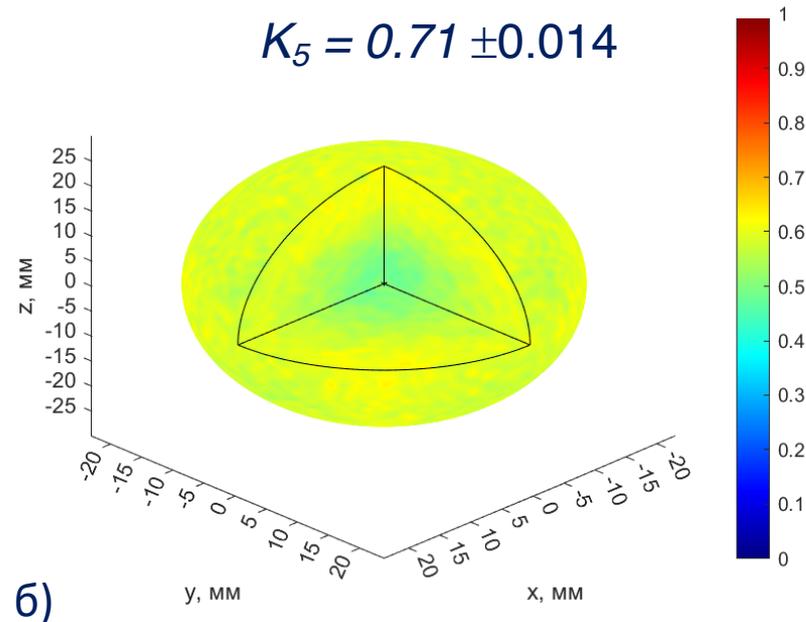
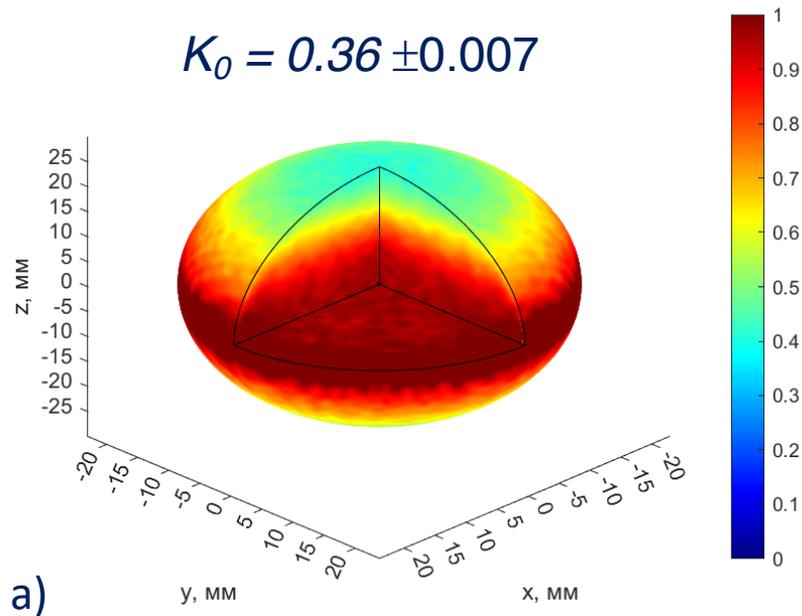


$$K_2 = 0.611 \pm 0.012$$



Распределения поглощенной дозы, нормированной на ее максимальное значение, по срезу фантома в форме цилиндра, при облучении электронами с энергией 9.5 МэВ с двух сторон с размещением пластин-модификаторов из алюминия толщиной 1.5 мм (б); толщиной 2 мм (в) и без них (а).

# Применение пластин-модификаторов для повышения однородности радиационной обработки объектов в форме шара



Распределение дозы, нормированной на ее максимальное значение, по срезу фантома в форме шара при облучении электронами с энергией 7 МэВ с двух сторон с размещением пластины-модификатора из алюминия толщиной 5 мм (б) и без нее (а).

## Результаты и выводы

1. Предложенный метод модификации пучка электронов позволяет увеличить однородность радиационной обработки объектов до 97% при облучении ускоренными электронами с начальной энергией от 4 МэВ до 10 МэВ при дополнительном размещении алюминиевых пластин-модификаторов толщиной от 0.5 мм до 5 мм.
2. Установлено, что алюминий, по сравнению с медью, железом, углеродом и водой, является более предпочтительным материалом для модификации пучка с целью увеличения однородности радиационной обработки объектов.
3. Полученные аналитические зависимости характеристик дозовых распределений от начальной энергии, линейных размеров и плотности облучаемого объекта позволяют оценить однородность облучения и определить целесообразность облучения объектов с плотностью от 0.3 до 1.6 г/см<sup>3</sup> пучками ускоренных электронов с энергией от 4 МэВ до 10 МэВ.
4. Установлено, что основной вклад в повышение однородности распределения дозы в объекте вносят первичные электроны, спектр которых размывается вследствие взаимодействия первичных электронов с пластиной-модификатором.
5. Получены аналитические выражения для расчета распределения поглощенной дозы по глубине объектов в форме параллелепипеда с ошибкой не более 5 % и спектра пучка электронов с ошибкой не более 10 % после прохождения пластин-модификаторов в диапазоне толщин пластин от 1 мм до 5 мм и начальных энергий электронов от 4 до 10 МэВ.

# Публикации

Диссертант является соавтором 22 печатных работ. Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus:

1. Computer simulation to determine food irradiation dose levels / F.R. Studenikin, U.A. Bliznyuk, A.P. Chernyaev et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2019. — Vol. 365. — P. 012002. DOI: 10.1088/1755-1315/365/1/012002. **SJR: 0.18**.
2. Влияние алюминиевых пластин-модификаторов пучка на однородность распределения поглощенной дозы по глубине объекта при обработке ускоренными электронами / Ф.Р. Студеникин, У.А. Близнюк, А.П. Черняев и др. // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. — 2022. №1. С. 3–9. РИНЦ: 0.972. Impact of Aluminum Plates on Uniformity of Depth Dose Distribution in Object During Electron Processing / F.R. Studenikin, U.A. Bliznyuk, A.P. Chernyaev et al. // Moscow University Physics Bulletin. 2022. 77, No. 1. **SJR: 0.28 (Q3)**.
3. Effect of electron and x-ray irradiation on microbiological and chemical parameters of chilled turkey / U. Bliznyuk, A. Chernyaev, F. Studenikin, V. Ipatova et al. // Scientific reports. — 2022. — Vol. 12, no. 1. — P. 750. **SJR: 1.24 (Q1)**.
4. Характеристики дозовых распределений электронных пучков, используемых при радиационной обработке пищевой продукции / Ф.Р. Студеникин, У.А. Близнюк, А.П. Черняев и др. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2021. — Т. 85, № 10. — С. 1418–1422. DOI: 10.31857/S0367676521100082. РИНЦ: 0.628. Characteristics of dose distributions of electron beams used in the radiation processing of food products / Studenikin F.R., Bliznyuk U.A., Chernyaev A.P. et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2021. — Vol. 85, no. 10. — P. 1097–1101. DOI: 10.3103/S1062873821100087. **SJR: 0.23 (Q3)**.
5. Оценка точности реконструкции бихроматических спектров пучков электронов по глубинным дозовым распределениям / Ф.Р. Студеникин, У.А. Близнюк, А.П. Черняев и др. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2021. — Т. 85, № 10. — С. 1430–1435. DOI: 10.31857/S0367676521100094. РИНЦ: 0,628. Estimating the accuracy of reconstructing bichromatic spectra of electron beams from depth dose distributions / Studenikin F.R., Bliznyuk U.A., Chernyaev A.P. et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2021. — Vol. 85, no. 10. — P. 1108–1112. DOI: 10.3103/S1062873821100099. **SJR: 0.23 (Q3)**.
6. Применение низкоэнергетических электронов для радиационной обработки охлажденной форели / А. П. Черняев, У. А. Близнюк, П. Ю. Борщеговская и др. // Письма в журнал Физика элементарных частиц и атомного ядра. — 2020. — Т. 17, № 4. — С. 681–687. Using low-energy electrons for the radiation treatment of chilled trout / A. P. Chernyaev, U. A. Bliznyuk, P. Y. Borshchegovskaya et al. // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2020. — Vol. 17, no. 4. — P. 611–614. **SJR: 0.29 (Q3)**.
7. Применение пучков ускоренных электронов для радиационной обработки продуктов питания и биоматериалов / У.А. Близнюк, А.П. Черняев, Ф.Р. Студеникин и др. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2017. — Т. 81, № 6. — С. 819–823. DOI: 10.7868/S0367676517060035. РИНЦ: 0,628. Using accelerated electron beams for the radiation processing of foodstuffs and biomaterials / Bliznyuk U.A., Studenikin F.R., Chernyaev A.P. et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2017. — Vol. 81, no. 6. — P. 743–747. DOI: 10.3103/S106287381706003X. **SJR: 0.23 (Q3)**.

# Доклады на конференциях

Основные итоги работы докладывались на 6 международных и всероссийских научных конференциях:

1. Метод повышения однородности распределения дозы по объёму объекта при облучении ускоренными электронами / Студеникин Ф.Р., Близнюк У.А., Черняев А.П. // «**Ломоносовские чтения - 2021**». Секция «Физика».
2. Повышение однородности распределения поглощённой дозы по объёму объектов сферической формы при радиационной обработке электронами / Студеникин Ф.Р., Золотов С.А., Близнюк У.А., Черняев А.П. // XXII межвузовская молодежная **научная школа-конференция имени Б.С. Ишханова «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине»**. 2021.
3. Оценка влияния сложной формы объекта на равномерность распределения поглощённой дозы / Студеникин Ф.Р., Золотов С.А., Близнюк У.А., Черняев А.П. // **LXXI Международная конференция «ЯДРО - 2021. Ядерная физика и физика элементарных частиц. Технологии ядерной физики»**.
4. Dose adjustment to ensure uniformity of cylindrical foodstuff irradiation / Studenikin F.R., Bliznuk U.A., Chernyaev A.P. et al. // **RAP CONFERENCE PROCEEDINGS**. — Vol. 5 of Conference RAP. — Sievert Association, Niš, Serbia, 2020. — P. 68–71.
5. Method of dose modification in foodstuffs during irradiation / Studenikin F.R., Bliznuk U.A., Chernyaev A.P. et al. // **BOOK OF ABSTRACTS INTERNATIONAL CONFERENCE ON RADIATION APPLICATIONS (RAP 2020)**. — Conference RAP. — Sievert Association, Niš, Serbia Oblačiča Rada 24/29, 18105 Niš, Serbia, 2020. — P. 4.
6. Новые направления в радиационной обработке продукции и материалов / Студеникин Ф.Р. , Близнюк У.А., Черняев А.П. и др. // Труды XX Межвузовской научной школы молодых специалистов **Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине** / Под ред. проф. Б.С. Ишханова, проф. Л.С. Новикова, А.А. Кузнецова, Э.И. Кэбина / Под ред. Б.С. Ишханов, А.А. Кузнецов, Э.И. Кэбин, Л.С. Новиков. — КДУ, Университетская книга, Москва, 2019. — С. 207–211.

## Грантовая поддержка проведенных исследований

1. «Влияние ионизирующего излучения на биохимические свойства сельскохозяйственной продукции» (участник). **РФФИ** 18-016-00198.
2. «Разработка метода и инструментов модификации энергетического спектра пучка ускоренных электронов для увеличения равномерности радиационной обработки продовольственных продуктов» (*личный грант*). **РФФИ** 20-32-90237 «Аспиранты».
3. «Разработка контейнера с коллиматорной подложкой для обеспечения однородности дозы в продовольственных товарах при радиационной обработке», поддержанного Фондом содействия инновациям для финансирования по программе «**УМНИК**» (*личный грант*).
4. «Научная стажировка» фонда поддержки молодых ученых имени Геннадия Комиссарова, место прохождения стажировки центр радиационной обработки «Теклеор», тема НИР «Разработка метода и инструментов модификации энергетического спектра пучка ускоренных электронов для увеличения равномерности радиационной обработки продовольственных продуктов» (*личный грант*).
5. В 2019 году стал лауреатом (1 место) V Международного конкурса научных работ в области радиозэкологии имени В.М. Ключковского в номинации «Научная работа специалистов до 35 лет» за цикл работ "Исследования воздействия ионизирующего излучения на микробиологические, биохимические и органолептические показатели пищевой продукции" (серия статей).
6. Финалист конкурса **МГУ «НАУКА XXI»** (2020 год).



**СПАСИБО  
ЗА ВНИМАНИЕ !**

Студеникин Ф.Р.  
м.н.с. НИИЯФ МГУ

[f.studenikin@gmail.com](mailto:f.studenikin@gmail.com)