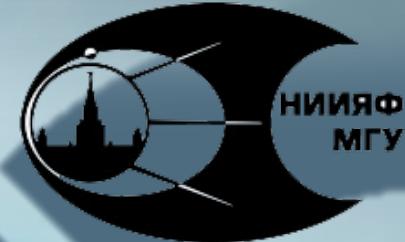




МГУ им. М.В.ЛОМОНОСОВА ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
НИИЯФ МГУ им. Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА



Физико-химические аспекты радиационной обработки биообъектов

Близнюк У.А., Черняев А.П., Борщеговская П.Ю., Студеникин Ф.Р.,
Ипатова В.С., Золотов С.А., Хмелевский О.Ю., Зубрицкая Я.В.

Актуальность

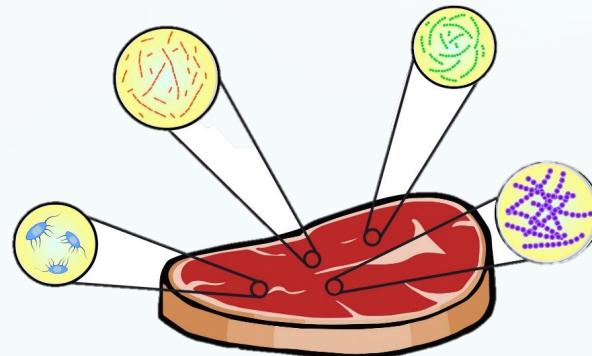
По данным ФАО ООН ежегодно в мире теряется примерно треть всех произведенных продуктов питания (**1,3 млрд. тонн**)

Мировые потери продукции на всех этапах производства

Ежегодные пищевые отходы и потери в мире

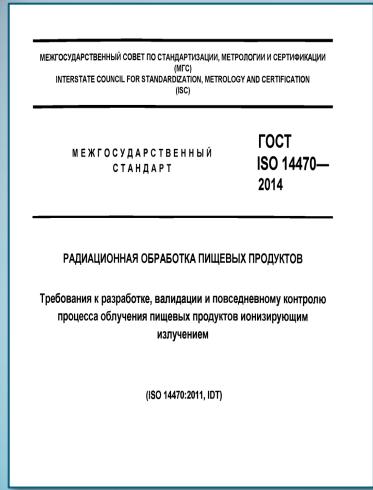


Микробиологическое загрязнение продуктов питания

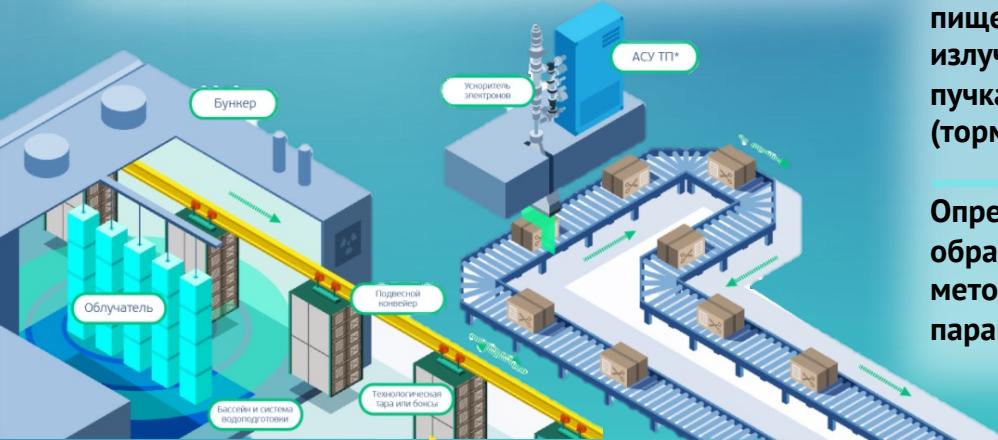


Источник: Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (FAO)

Радиационная обработка



ГОСТ ISO 14470-2014. Разработка, валидация и контроль процессов облучения



Стандарты ГОСТ по радиационной обработке

Разработка по облучению ряда
продуктов питания

Дозиметрия при обработке
пищевых продуктов гамма-
излучением, электронными
пучками и рентгеновским
(тормозным) излучением

Определение факта радиационной
обработки продуктов питания
методом электронного
парамагнитного резонанса ряда

ГОСТ 33339-2015
ГОСТ 33340-2015
ГОСТ 33271-2015
ГОСТ 33302-2015

ГОСТ Р ИСО/АСТМ
51204-2012
ГОСТ Р ИСО/АСТМ
51431-2012

ГОСТ Р 52529-2006
ГОСТ Р 53186-2008
ГОСТ Р 52829-2007

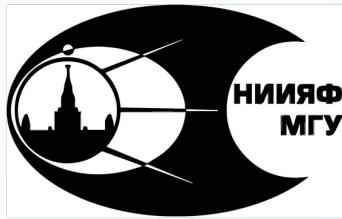
Направления исследований

Исследование влияния характеристик ионизирующего излучения на микробиологические и химические показатели пищевой продукции и поиск технологических диапазонов радиационной обработки;

Поиск биохимических маркеров в продуктах питания и разработка новых методов выявления химических изменений в продуктах после радиационной обработки;

Повышение эффективности радиационной обработки объектов ускоренными электронами.

Сотрудничество



Национальный исследовательский центр
ядерной физики имени Д. В.
Скобельцына МГУ



Химический факультет МГУ



Роспотребнадзор



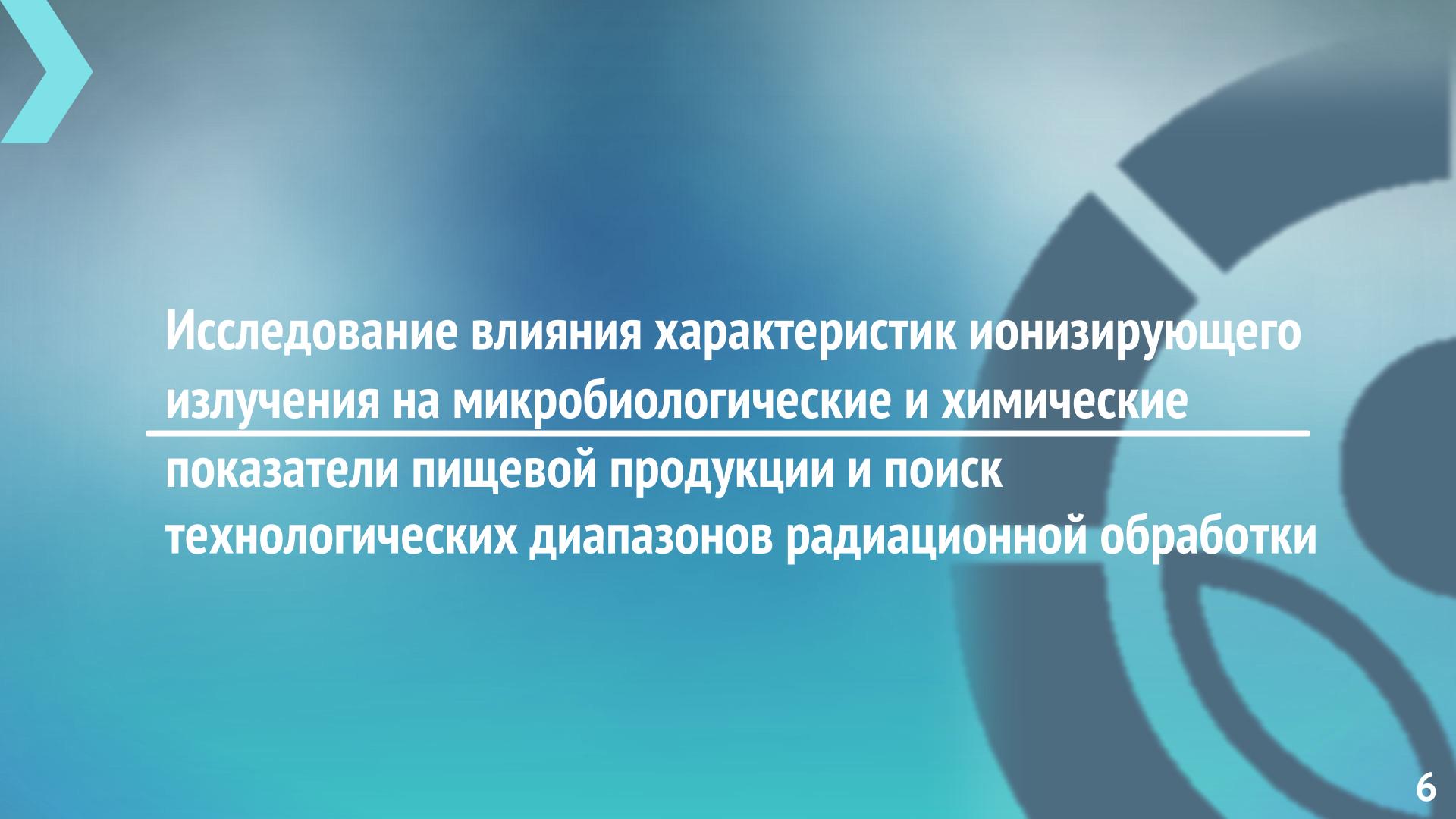
Всероссийский научно-исследовательский
институт лекарственных и ароматических
растений (ВИЛАР)



Биологический факультет МГУ



Сибирский федеральный научный
центр агробиотехнологий академии
РАН

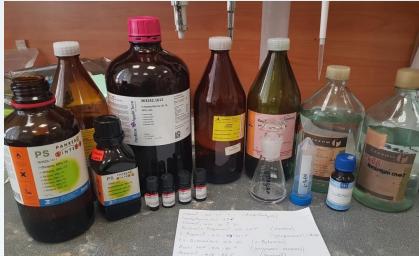


Исследование влияния характеристик ионизирующего излучения на микробиологические и химические показатели пищевой продукции и поиск технологических диапазонов радиационной обработки





Бактерии E.coli



Стандартные
образцы



Охлажденная мясная (говядина,
свинина), рыбная (форель, семга)
продукция и мясо птицы (курица, индейка)



Объекты исследования



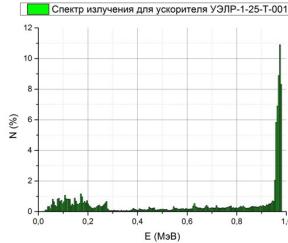
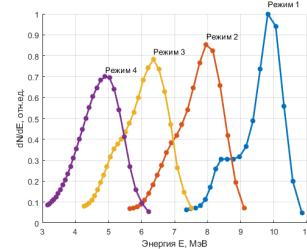
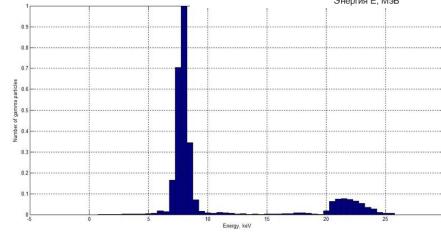
Картофель различных сортов



Семена пшеницы, льна, рапса



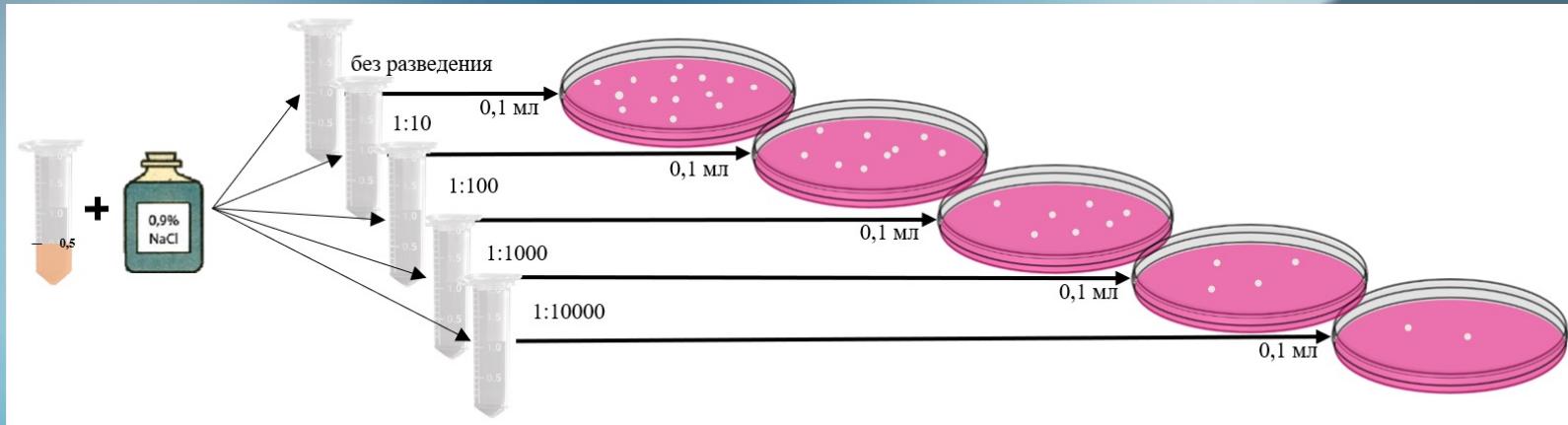
Источники ионизирующего излучения

Источник	Основные характеристики	Спектр
Ускоритель электронов УЭЛР-1-15-Т-001	<ul style="list-style-type: none">➤ Энергия – 1 МэВ➤ Ток – 5 нА - 500 нА➤ Напряжение – 15 кВ	
Ускоритель электронов УЭЛР-10-15-С-60	<ul style="list-style-type: none">➤ Энергетические режимы – 5 МэВ, 6.5 МэВ, 8 МэВ, 10 МэВ➤ Мощность пучка – 1 - 15 кВт➤ Рабочая частота – 2856 МГц	
Рентгеновский аппарат ДРОН-УМ2	<ul style="list-style-type: none">➤ Энергия – 30 кэВ➤ Ток – 25 мА - 50 мА➤ Напряжение – 25 кВ - 60 кВ	

Дозиметрический контроль

Тип	Формула	Погрешность измерения	Фото / схема облучения
Радиохромные пленки СО ПД(Э) – 1/10, СО ПД(Ф)Р – 5/50	$D = 8,1 \cdot \Delta S^{0,981}$	5 %	
Ферросульфатный раствор Фрикке	$D = \frac{k \Delta S}{\rho G(Fe^{3+}) \varepsilon l}$	10 %	
Моделирование GEANT4	$D = \left(\frac{Q_{exp}}{Q_{model}} \right) \cdot D_{model}$	2 %	

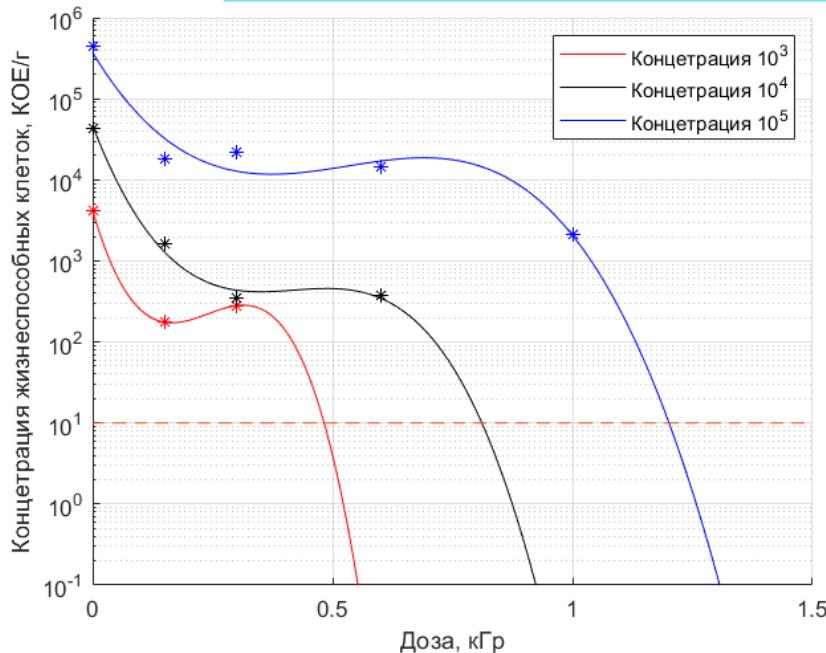
Микробиологический анализ (методика)



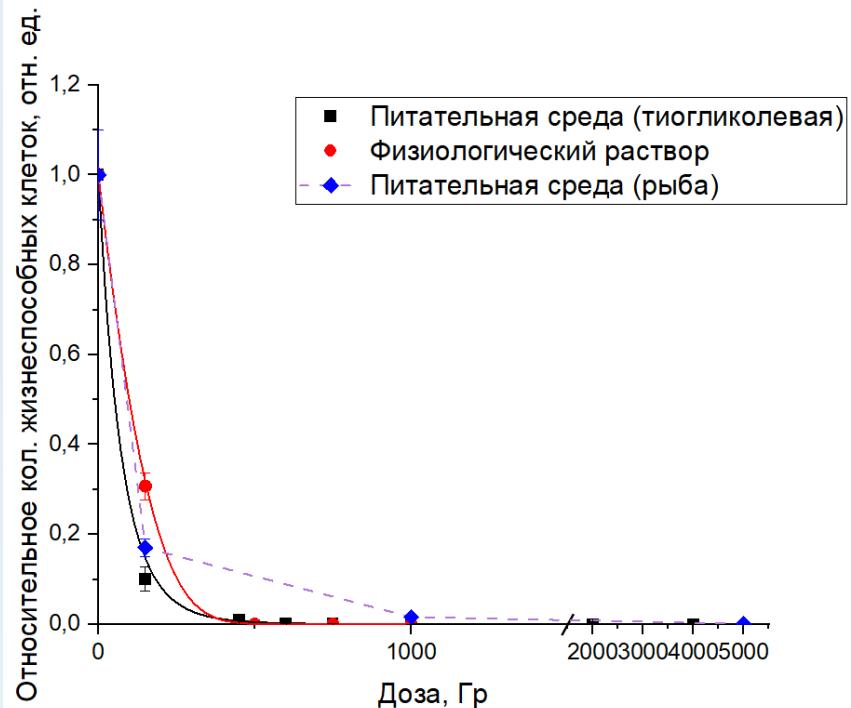
- **Разведение образцов с физиологическим раствором** в соотношении от **1:10** до **1:10000** и без разведения;
- **Нанесение суспензии** в чашки Петри на **поверхность агаризованной тиогликолевой среды**;
- **Расчет концентрации жизнеспособных клеток** в КОЕ/г методом Коха.

Влияние дозы облучения на выживаемость условно-патогенных бактерий E.coli

$$f(D) = e^{a+bD+cD^2+dD^3+o(D^3)}$$

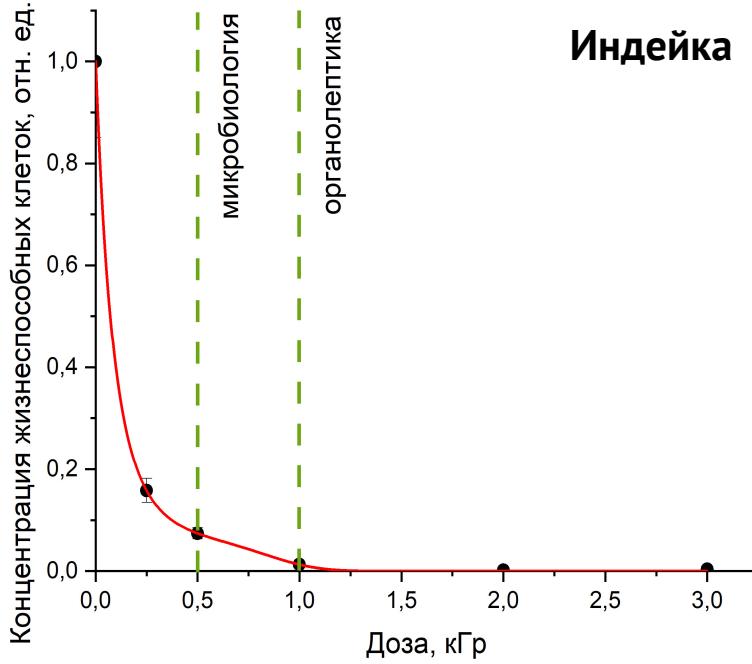


Зависимость концентрации жизнеспособных клеток *E. coli* от дозы облучения для разных начальных концентраций

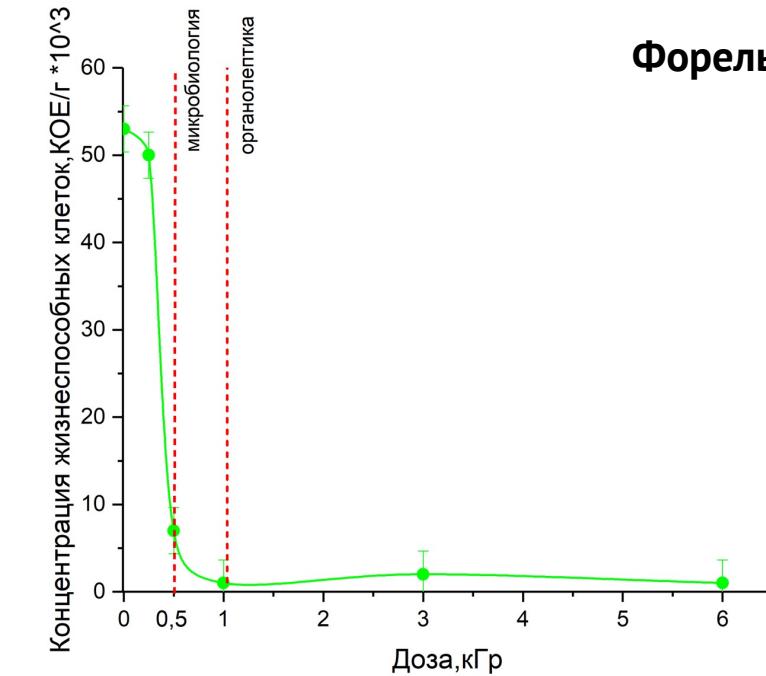


Зависимость концентрации жизнеспособных клеток *E. coli* от дозы облучения для разных сред – физиологический раствор; тиогликоловая питательная среда; рыбная питательная среда

Влияние дозы облучения на микробиологические показатели пищевой продукции

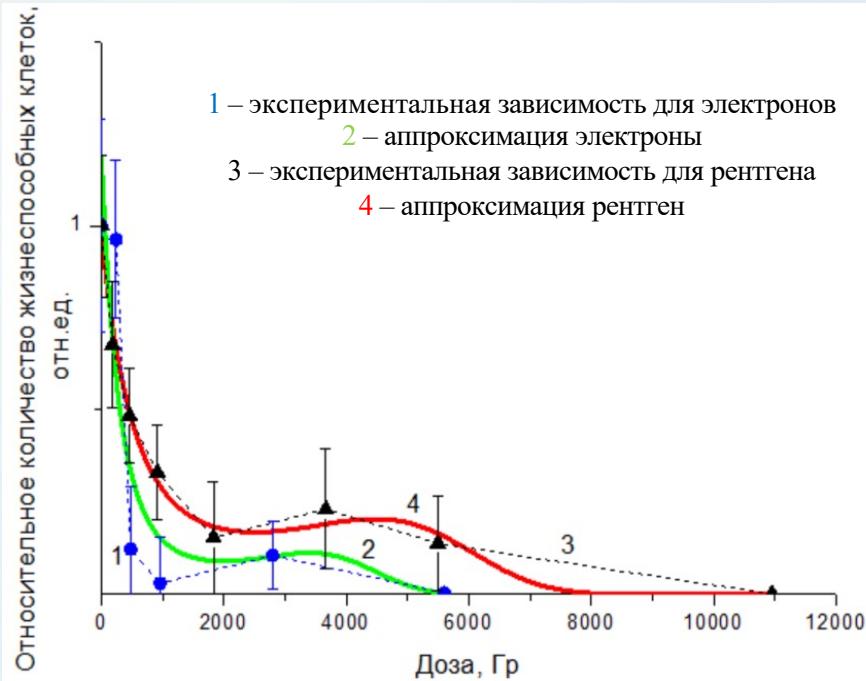


Зависимость **концентрации** жизнеспособных клеток
от дозы электронного облучения в мясе птицы

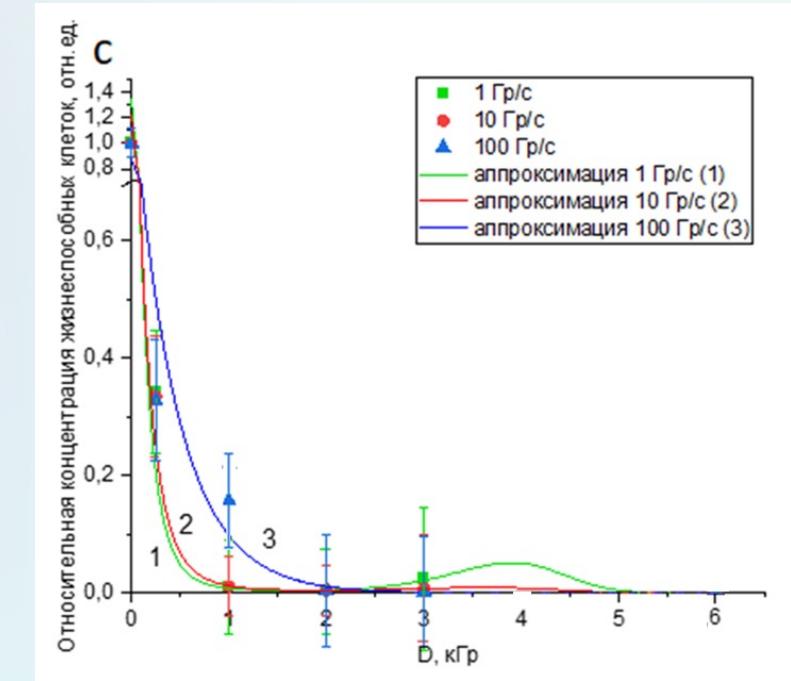


Зависимость **концентрации** жизнеспособных клеток **от дозы**
рентгеновского и электронного облучения в мясе рыбы

Влияние характеристик излучения (тип излучения, мощность дозы) на микробиологические показатели пищевой продукции



Зависимость концентрации жизнеспособных клеток от дозы рентгеновского и электронного облучения



Зависимость концентрации жизнеспособных клеток от мощности дозы электронного облучения

Мониторинг микробиологических показателей продукта после радиационной обработки

Доза облучения, кГр

K

0.24

0.48

0.96

2.8

5.6

Образцы гомогената
рыбы, 0,5 г



- Без разведения
- 1:2
- 1:10
- 1:100
- 1:1000
- 1:10000

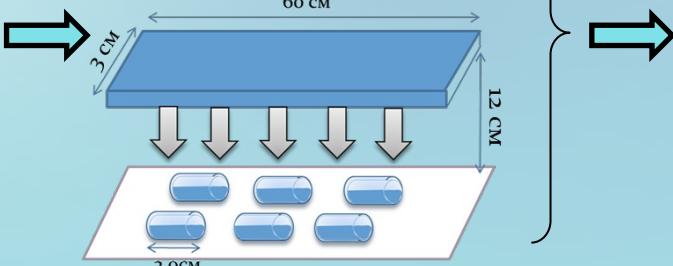


Схема проведения облучения
образцов на ускорителе
электронов

Высев

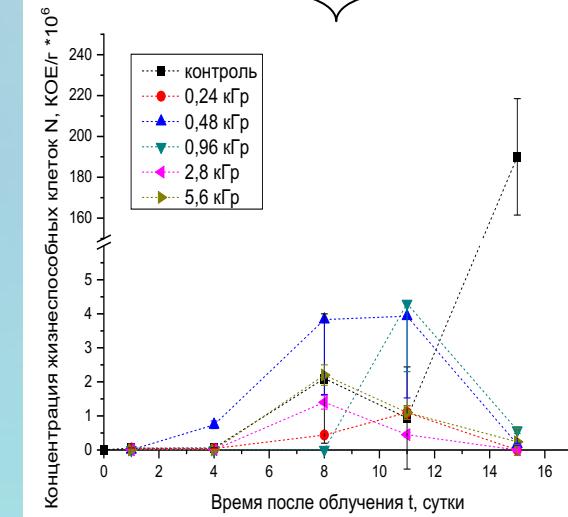
Расчет количества жизнеспособных бактерий



1 день 4 день 8 день 11 день 15 день

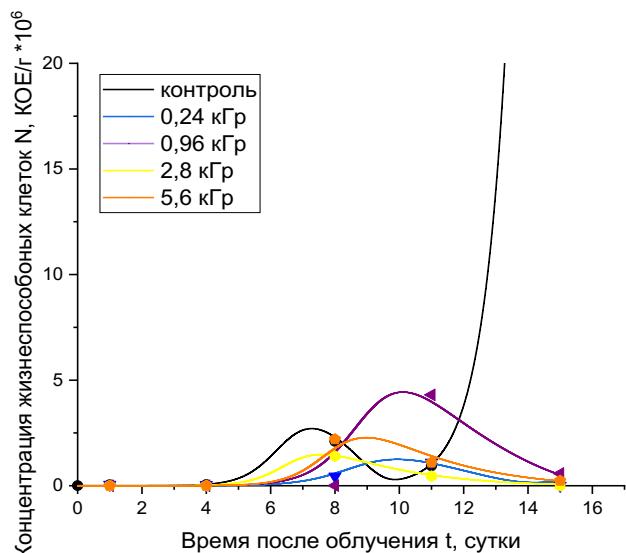
t, время

Т хранения 4 °C



Зависимость общей концентрации жизнеспособных клеток в
образцах рыбы, облученных ускоренными электронами в различных
дозах, от времени после проведения обработки

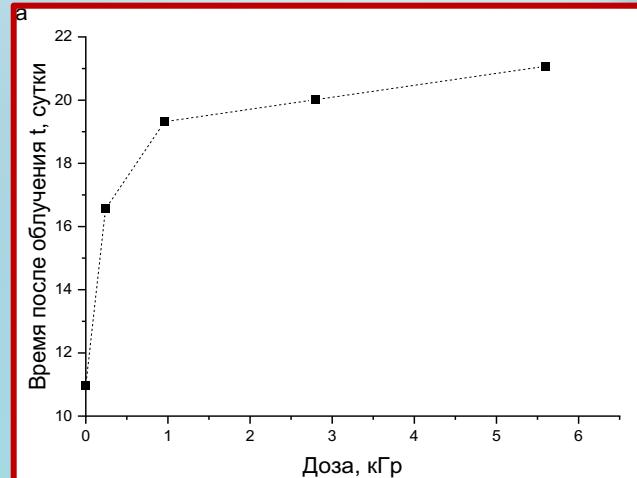
Моделирование кинетики изменения микробиологических показателей продуктов питания в период хранения после проведения радиационной обработки



$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = \alpha_1 N_1(F - b_1 N_1 - b_2 N_2) + g_1 N_1 N_2 \\ \frac{dN_2}{dt} = \alpha_2 N_2(F - b_1 N_1 - b_2 N_2) + g_2 N_1 N_2 \\ \frac{dF}{dt} = -\gamma(b_1 N_1 + b_2 N_2) \end{cases}$$

↓

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = \alpha_1 N_1(F - b_1 N_1) + g_1 N_1 N_2 \\ N_2(t) = N_2(t_0) \exp(\alpha_2(t - t_0)) \\ \frac{dF}{dt} = -\gamma b_1 N_1 \end{cases}$$



Модельные зависимости общей концентрации жизнеспособных клеток в образцах, облученных ускоренными электронами в различных дозах, от времени после проведения обработки

Зависимость времени после облучения, когда концентрация жизнеспособных бактерий превышает 10^6 КОЕ/г от дозы

Выводы

1

Значение поглощенной дозы, соответствующей **нижней границе эффективного диапазона доз** радиационной обработки, зависит как от характеристик самого продукта (**начальная обсемененность продукции, концентрация питательных веществ**), так и от характеристик излучения (**тип излучения, мощность дозы**).

2

Предложена математическая **модель**, описывающая изменение **микробиологических показателей** продукции, позволяющая оценить **сроки хранения** продукции, прошедшей радиационную обработку в различных дозах.

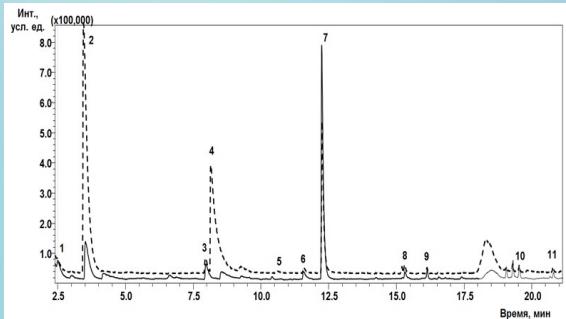
Химический анализ

ГХ-МС

«Газовая хромато-масс спектрометрия»



Газовый хромато-масс-спектрометр
Shimadzu GCMS-QP2010 Ultra

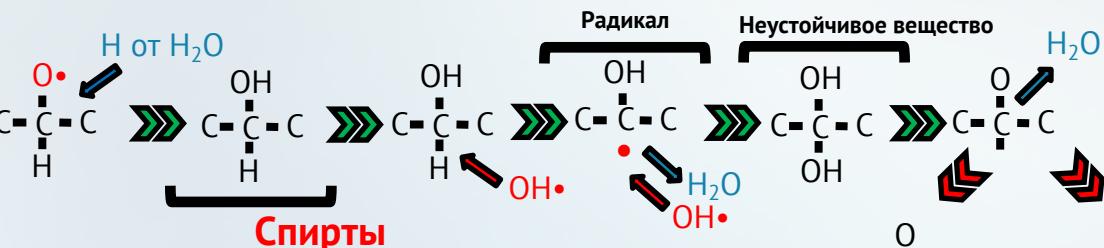
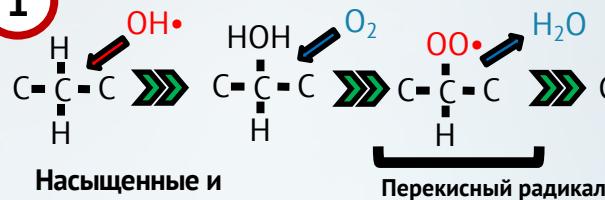


Хроматограмма образцов индейки

- 2 г образца помещали в виалу и добавляли 4 мл NaCl 3% и герметично закрывали;
- Исследуемые образцы помещали в ультразвуковую ванну;
- Затем образцы термостатировали при $T=95^{\circ}$;
- Для определения летучих соединений использовали ГХ-МС;
- Проводился сбор данных и обработка хроматограмм;
- Производилась идентификация компонентов.

Условная схема радикальных реакций жирных кислот

1



2



Термодинамически неустойчивое соединение



Кетоны
стабильные, не участвуют в радикальных реакциях

Альдегиды
не стабильные



Карбонильные кислоты и другие альдегиды, кетоны

Примеры распада жирных кислот на летучие соединения

Пентен, пентанал, гексаналь, гептаналь, 1-октен, октаналь

Линолевая кислота

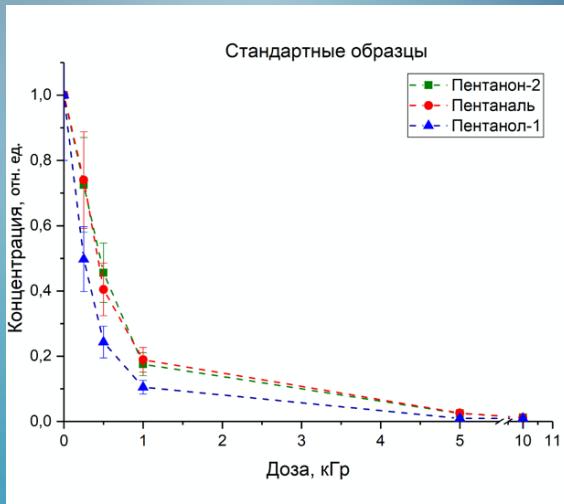
Олеиновая кислота

гептаналь
октаналь
нонаналь

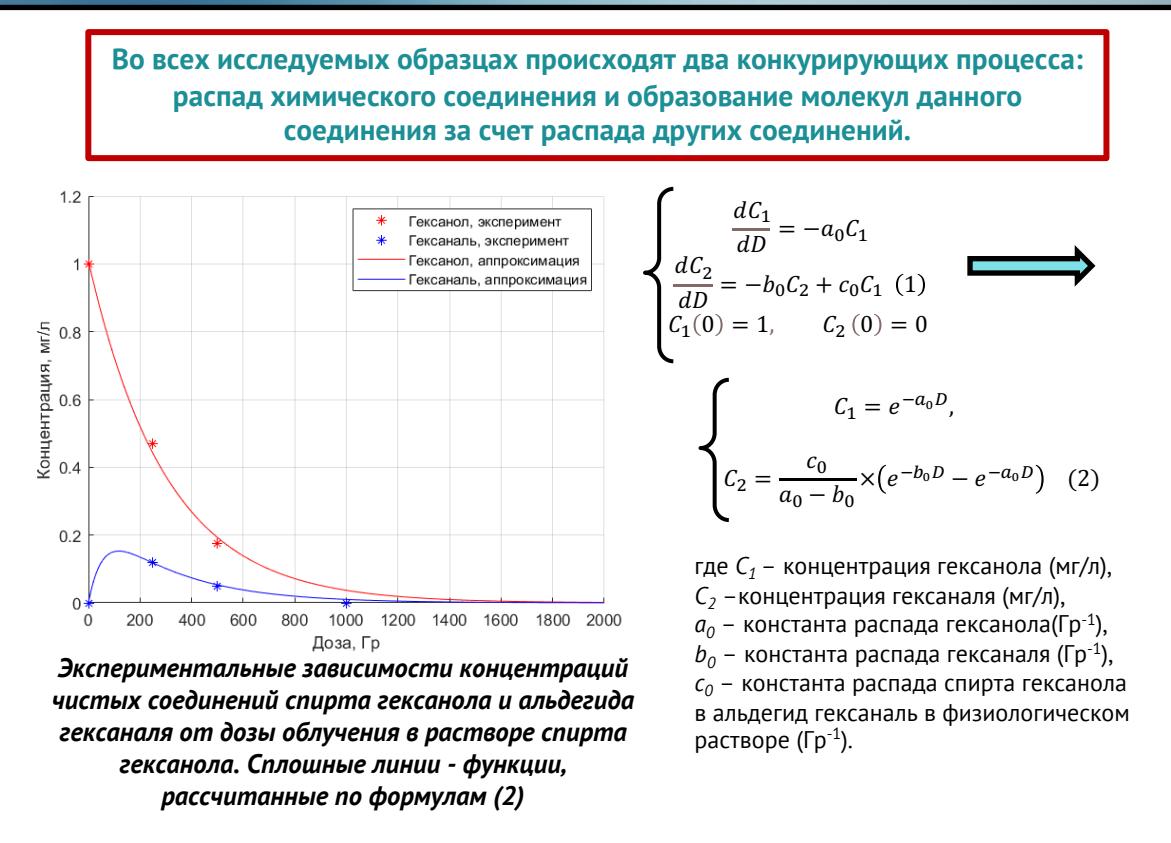
Идентифицируемые органические летучие соединения в пищевых продуктах методом ГХ-МС

Идентифицированное соединение	Класс	m/z	Идентифицированное соединение	Класс	m/z
Гексаналь	альдегид	82	2 метил-1-бутанол	спирт	71
Пентаналь		58	1-пентен-3-ол		86
Гептаналь		81	Этанол		45
Нонаналь		98	2 - Пропанол		59
Этаналь		44	1 гексанол		68
3 Метилбутаналь		86	Толуен		91
Пропаналь		58	Октен		85
Бутаналь		86	1 гептен		98
2 Метилпропаналь		72	Гексан		86
2,3 бутандион	кетон	86	Гептан		71
Ацетон		58	и др.		

Результаты исследования влияния характеристик излучения на чистые органические летучие соединения

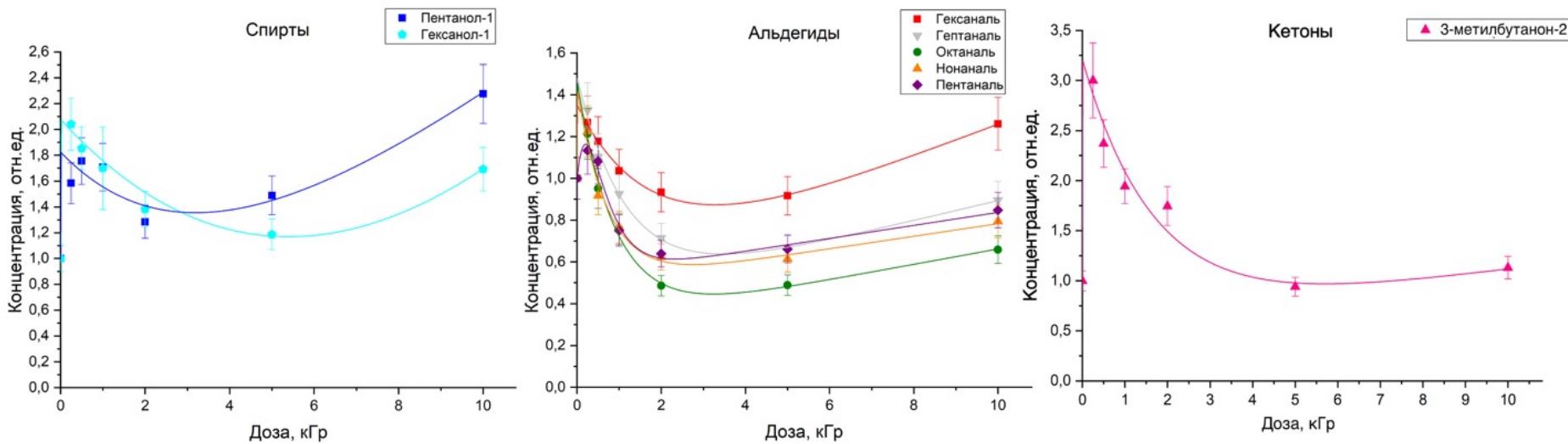


Экспериментально измеренные зависимости концентраций стандартных образцов пентанона, пентанола, пентанона в физиологическом растворе от дозы облучения



Результаты исследования влияния характеристик излучения на органические летучие соединения пищевой продукции

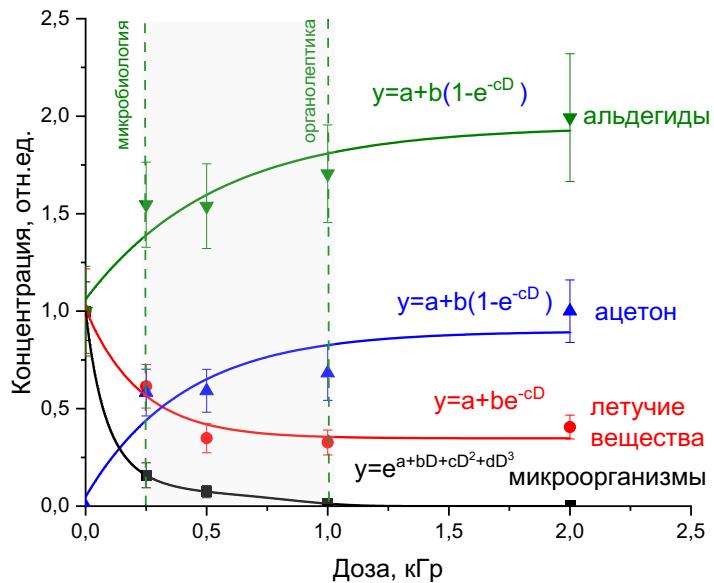
$$C(D) = C_{\text{расп}}(D) + C_{\text{накопл}}(D) = a \times e^{-dD} + b \times (1 - e^{-cD}) + k \times D \quad (3)$$



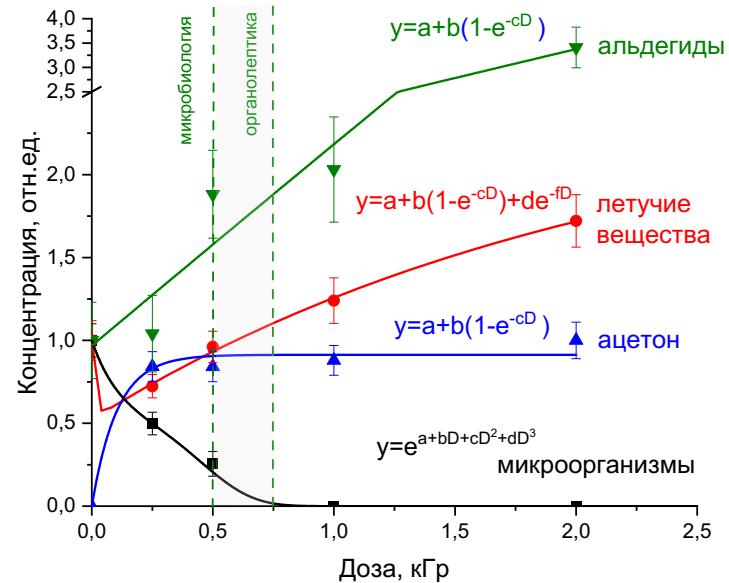
Экспериментальные зависимости изменений концентраций спиртов(a), альдегидов(b) и кетонов(c) в образцах семги от дозы облучения и соответствующие им функции изменения концентраций с дозой облучения, рассчитанные по формуле (3).

Результаты исследования влияния характеристик излучения на органические летучие соединения пищевой продукции

электроны



рентгеновское излучение



Изменение концентраций летучих веществ, ацетона (потенциального маркера), альдегидов и клеток микроорганизмов в индейке от дозы, создаваемой в продукте ускоренными электронами и рентгеновским излучением

Выводы

1

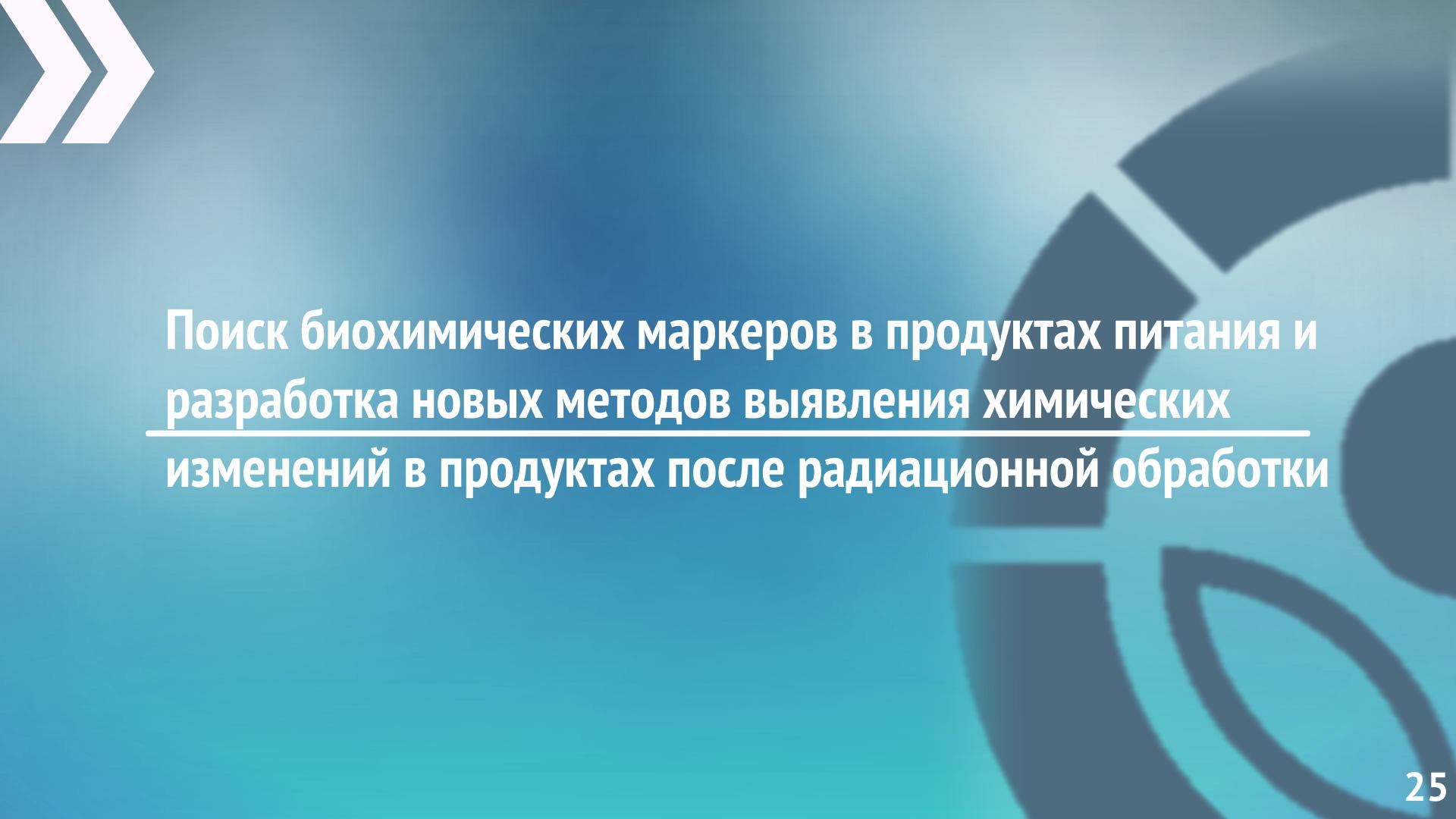
Установлена **нелинейная** зависимость концентрации **органических летучих соединений** в образцах продукции мясного и рыбного происхождения **от дозы** облучения продукции.

2

Предложена математическая **модель**, описывающая изменение концентрации летучих соединений с увеличением дозы облучения продукта, основанная на **двух конкурирующих процессах**: их **распаде** за счет воздействия излучения и **накоплении** за счет распада других соединений.

3

Значение поглощенной дозы, соответствующей **верхней границе эффективного диапазона доз** радиационной обработки, зависит как от характеристик самого продукта (состав органических соединений), так и от характеристик излучения (**тип излучения, мощность дозы**).

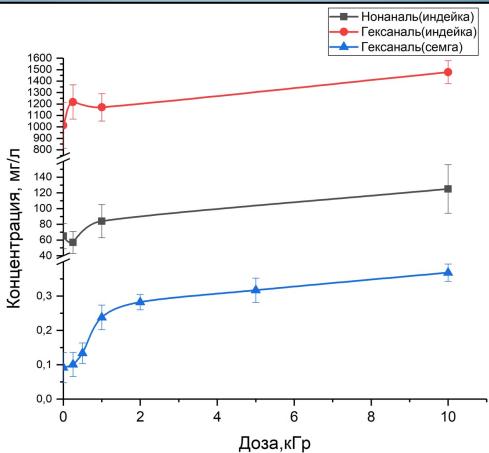


Поиск биохимических маркеров в продуктах питания и разработка новых методов выявления химических изменений в продуктах после радиационной обработки

Потенциальных биохимические маркеры радиационной обработки пищевой продукции

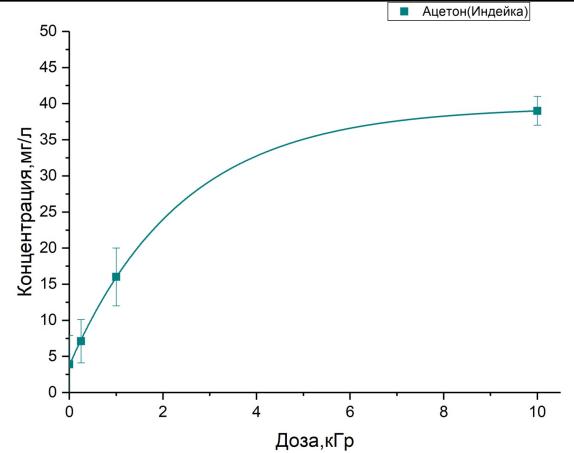
Гексаналь, Нонаналь,
Гептанааль, Октанааль,
Пентанааль

Семга, дорадо, индейка, курица



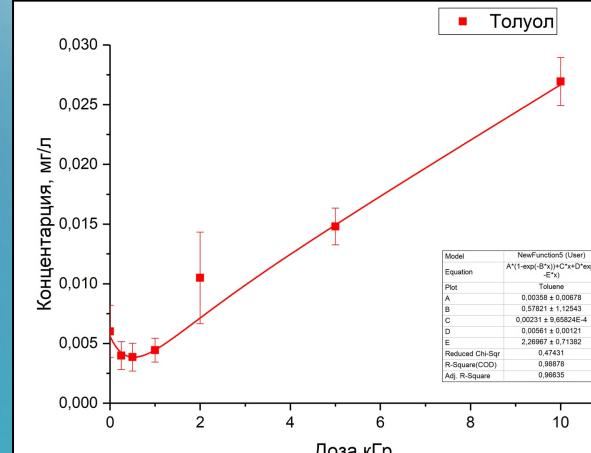
Увеличение концентрации
примерно в **1,4 - 6 раз**
при 10 кГр

Ацетон
Индейка



Увеличение концентрации
примерно в **30-40 раз** при 10 кГр

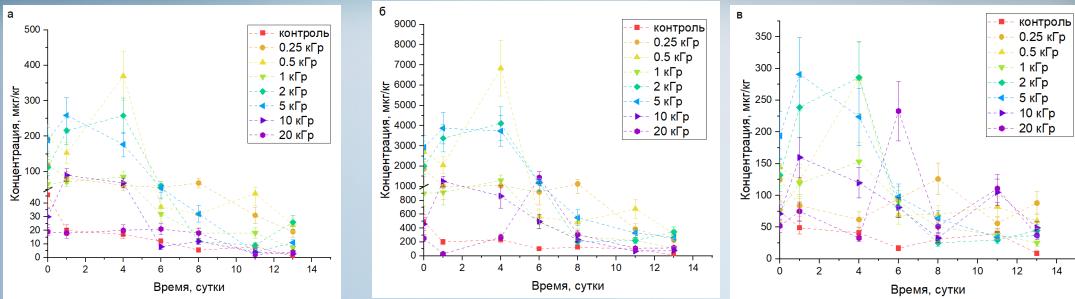
Толуол
Семга



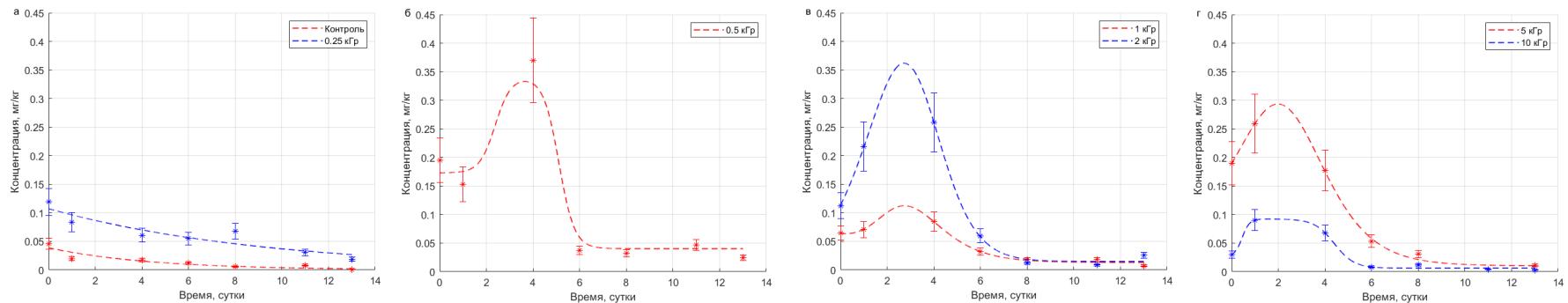
Увеличение концентрации
примерно в **5-6 раз** при 10 кГр

Поиск маркеров

С увеличением дозы облучения пик накопления концентрации альдегидов в исследуемых образцах в сдвигается в сторону меньшего времени хранения



Зависимость концентрации пентаналя (а), гексаналя (б), гептаналя (в) в мясе курицы после облучения в различных дозах от времени хранения



Модельные зависимости концентрации пентаналя в образцах мяса курицы, облученных в дозах 0 кГр и 0.25 кГр (а), 0.5 кГр (б), 1 кГр и 2 кГр (в), 5 кГр и 10 кГр (г) от времени хранения

Выводы

1

Обнаружен **ряд летучих органических соединений** в образцах продуктов мясного и рыбного происхождения, прошедших радиационную обработку, концентрация которых **возрастает** с увеличением дозы **на первые сутки** после облучения.

2

Обнаружен **пик возрастания** концентрации **альдегидов** в образцах продукции мясного и рыбного происхождения после радиационной обработки **в дозах выше 250 Гр** в течение **первых 4 суток хранения продукции**. **Альдегиды** – потенциальные **маркеры** радиационной обработки в первые 4 суток хранения.

Поиск новых методов идентификации факта облучения продукта



Метод с применением тиобарбитуровой кислоты
Жиросодержащие продукты; продукты, содержащие влагу.

Новый метод
Охлажденная бескостная мясная и рыбная продукция, а также мясо птицы; корнеплоды

Газовая/жидкостная хромато-масс спектрометрия
Широкий спектр химических соединений (белки, углеводы, нуклеиновые кислоты); Жиросодержащие продукты.

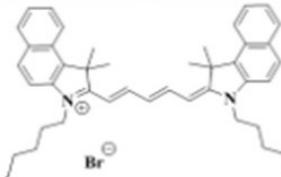
Метод «отпечатков пальцев»

**Механизмы
формирования
аналитического сигнала
с использованием
карбоцианиновых
красителей**

Индикаторные реакции основанные на

агрегации

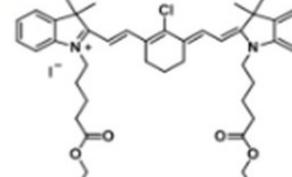
красителя - поверхностно-активного вещества-аналита



+ аналит
+ ПАВ

карбоцианиновый краситель
(не флуоресцирует в воде)

окислении красителя



+ аналит
+ H₂O₂
+ Cu(2+)

карбоцианиновый краситель
(флуоресцирует в воде)



Флуоресцентная тройная агрегация
краситель - ПАВ - аналит

Флуоресценция



96-ти луночный
планшет



Не флуоресцирующие
продукты деструкции

Флуоресценция или
абсорбция

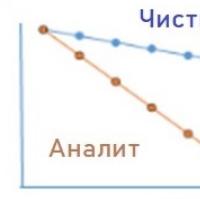
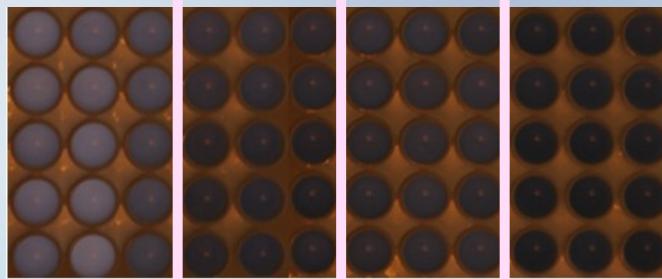
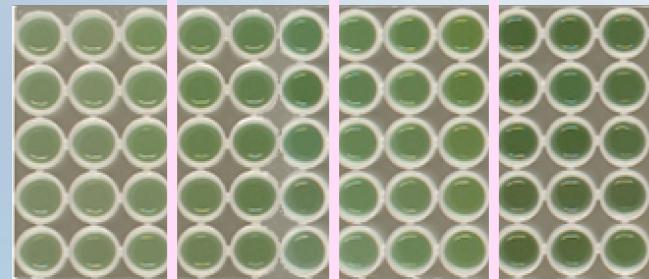


Фото образцов с растворами экстракта картофеля, облученного в дозах 100 Гр, 1 кГр, 10 кГр, а также контрольных необлученных клубней с добавлением красителей, сделанные в ИК и ВИД диапазоне

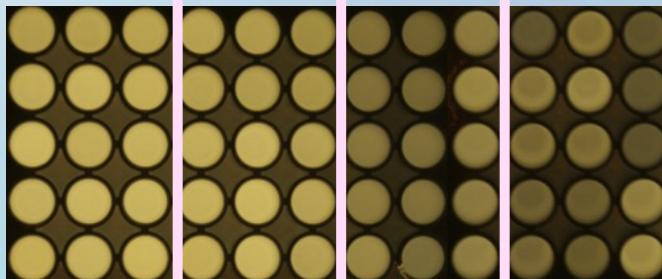
Реакция окисления с добавлением красителя 2
(11 минут после добавления красителя)



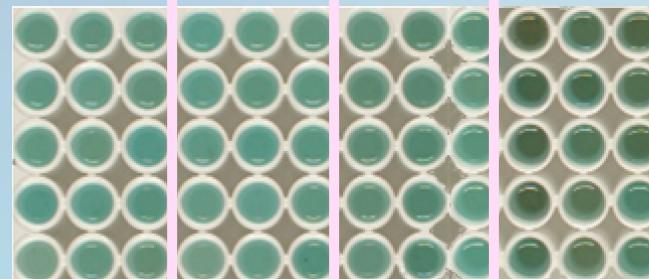
Реакция окисления с добавлением красителя 2
(11 минут после добавления красителя)



Реакция агрегации с добавлением красителя 1



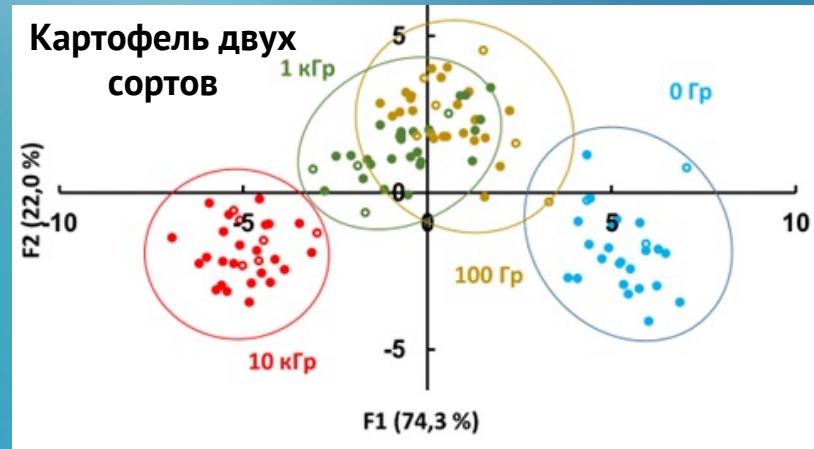
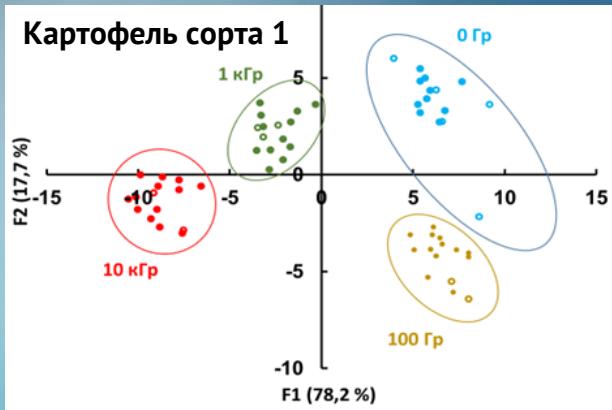
Реакция агрегации с добавлением красителя 1



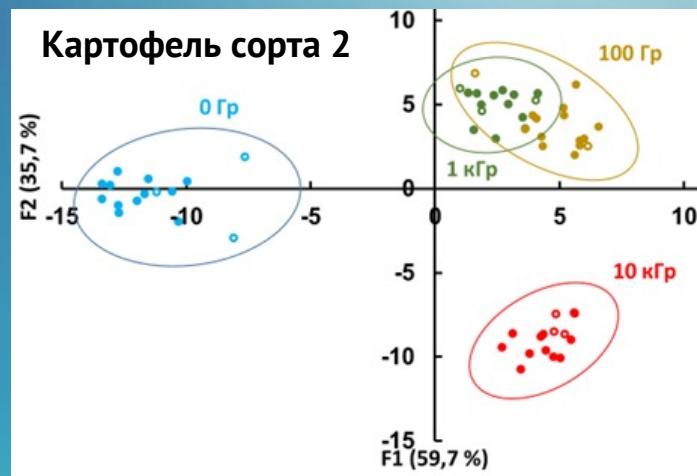
контроль 100 Гр 1 кГр 10 кГр

контроль 100 Гр 1 кГр 10 кГр

Идентификация образцов картофеля двух сортов, облученного ускоренными электронами в различных дозах



Графики счетов дискриминантного анализа



Различение клубней 2 сортов с вероятностью 85%.

Идентификация образцов картофеля одного сорта, облученных рентгеновским излучением в различных дозах

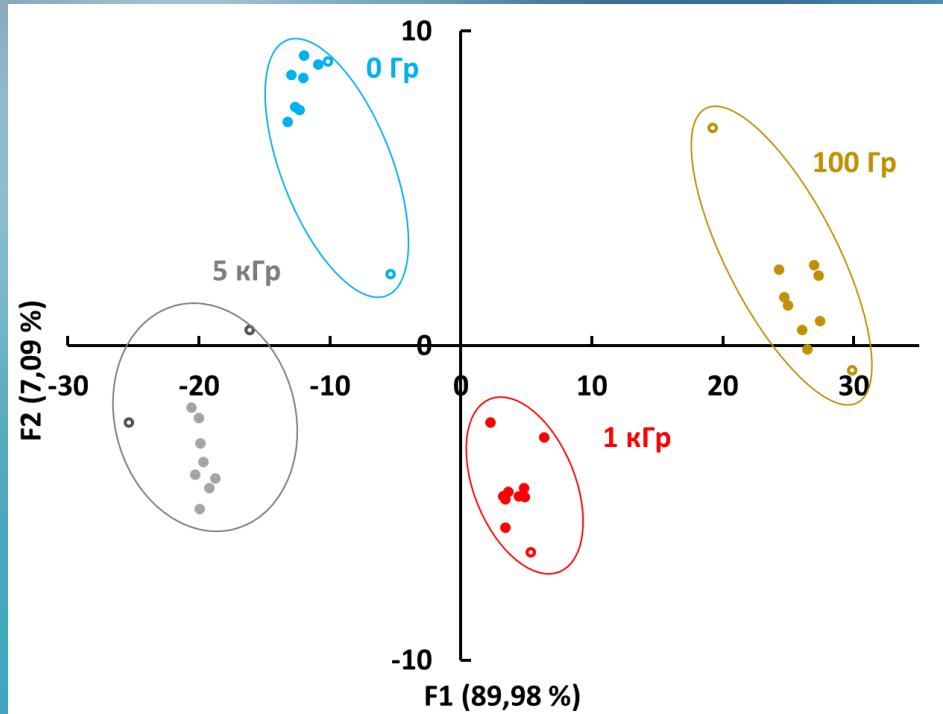


График счетов дискриминантного анализа

Для образцов, облученных рентгеновским излучением, достигается **95 % вероятность различия**.

Выводы

1

Было достигнуто **полное или частичное разделение** образцов картофеля, облученных в дозах 100 Гр, 1 кГр, 10 кГр, и контрольных образцов.

2

Преимущество метода – **простота** (не требуется приборов, кроме фотокамер и светодиодного источника красного света).

3

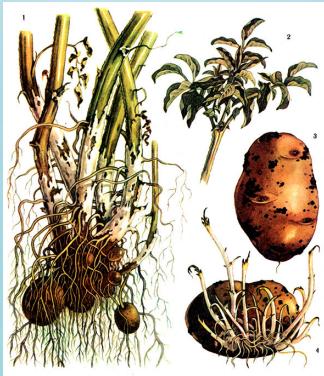
Ограничение метода – необходимость анализа необлученных контрольных образцов известного состава наряду с неизвестными образцами, участвующими в исследовании.

4

Повышение правильности различия образцов продукции, прошедшей радиационную обработку, возможно **за счет новых индикаторных** реакций, более чувствительных к составу образцов продукции.

Поиск эффективных диапазонов доз радиационной обработки сельскохозяйственных культур

Поражение клубней картофеля грибами *R. solani* (ризоктониоз)

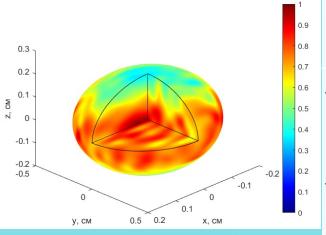
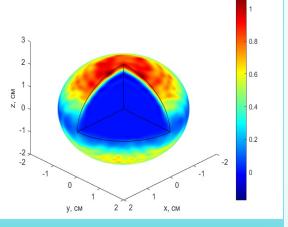


Поражение зерна пшеницы грибами *Fusarium* (фузариоз)

Фузариозное увядание картофеля и льна

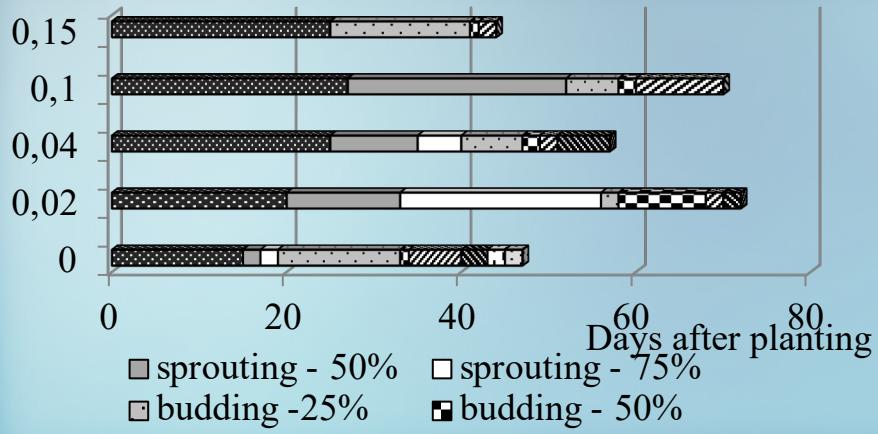


Методика исследований

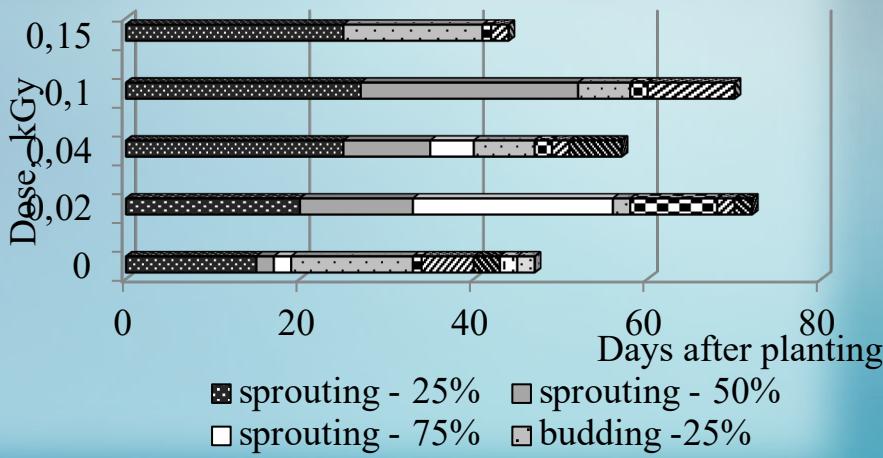
Объект	Параметры облучения на ускорителе УЭЛР-1-25-Т-001	Методика эксперимента
Склероции гриба R.Solani 	<ul style="list-style-type: none">➤ 20 Гр – 38 кГр➤ Ток пучка 50 нА – 500 нА➤ Одностороннее облучение	<ul style="list-style-type: none">✓ Выращивание склероций в питательной среде;✓ измерение диаметров колоний фитопатогена через 24, 48, 72, 96 часа.
Семена льна, пшеницы, сои, рапса с естественным заражением фитопатогеном 	<ul style="list-style-type: none">➤ 5 Гр – 100 Гр➤ Ток пучка 50 нА,➤ Одностороннее облучение 	<ul style="list-style-type: none">✓ Выращивание семян в питательной среде;✓ измерение всхожести семян и диаметра колонии фитопатогена на 5 и 7 сутки после высея.
Клубни картофеля сорта Лина и Розмари с естественным заражением фитопатогеном 	<ul style="list-style-type: none">➤ 20 Гр – 200 Гр➤ Ток пучка 50 нА,➤ Двустороннее облучение 	<ul style="list-style-type: none">✓ Выращивание клубней на опытной станции «Элитная» (2 года);<ul style="list-style-type: none">✓ измерение кинетики роста и фракционного состава урожая картофеля;✓ фитоэкспертиза урожая картофеля

Влияние дозы обработки семенных клубней на кинетику развития растений и фракционный состав урожая картофеля сорта Лина

1 год



2 год

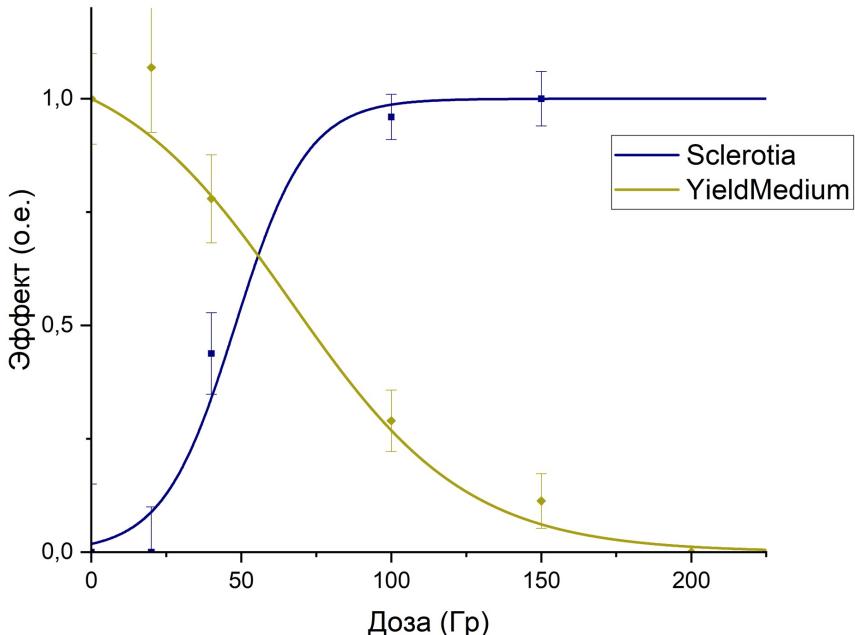


Урожай картофеля

Фракции полученного урожая:

Малая – до 40 г;
Средняя – от 40 до 80 г;
Крупная – более 80 г.

Влияние дозы обработки семенных клубней сорта Лина на урожайность и степень заражения клубней картофеля сорта Лина



Зависимость подавления урожайности картофеля и степени заражения клубней от дозы облучения

$$U(D) = \frac{a}{1 + e^{b*(D-c)}} + f$$

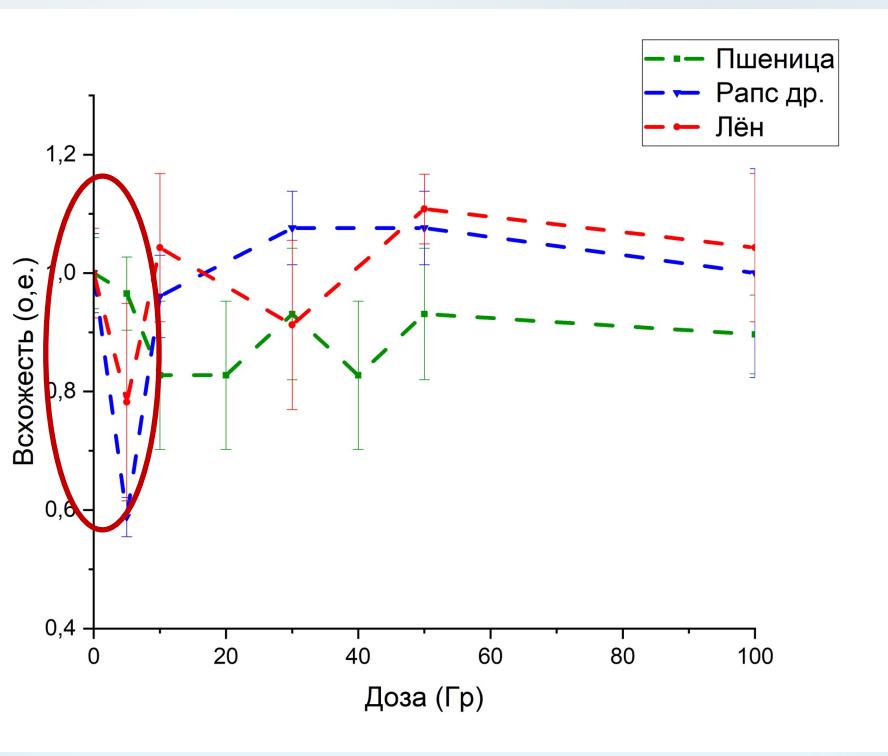
*a – максимальное значение урожайности;
b - параметр, характеризующий ширину распределения функции урожайности ;
c - значение дозы, при которой значение урожайности уменьшается в 2 раза;
f - невосприимчивая к обработке доля семенного материала.*

Эффективный диапазон доз радиационной обработки картофеля

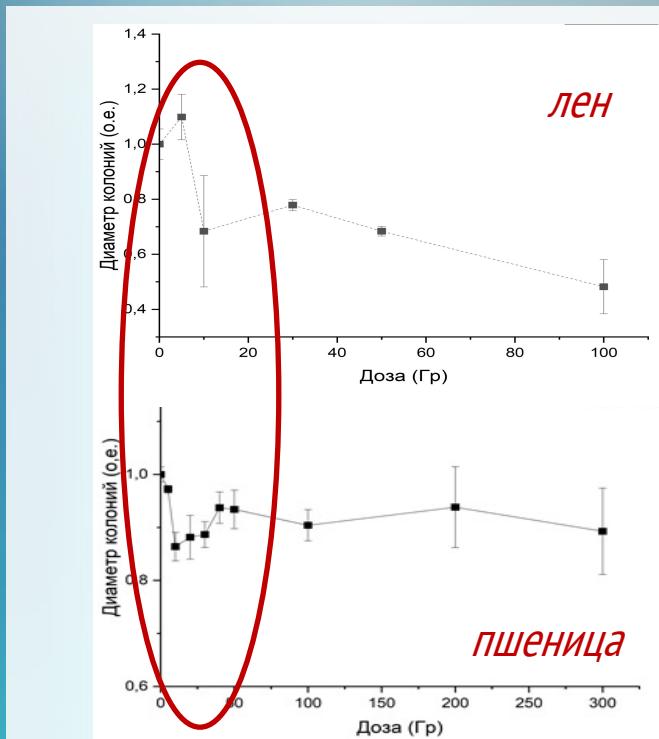
Показатель	$D_{\text{пор}}$ (Гр), 1 год	$D_{\text{пор}}$ (Гр), 2 год
Урожайность средней фракции	81 ± 10	80 ± 20
Склероциальные формы ризоктиниоза	48 ± 8	50 ± 10
Несклероциальные формы ризоктиниоза	50 ± 5	25 ± 3



Влияние дозы обработки семян на всхожесть и фитосанитарное состояние культур



Зависимость всхожести семян от дозы облучения



Зависимость диаметров колоний фитопатогена на семенах льна и пшеницы от дозы облучения

Выводы

1

Подавление активности фитопатогена R. Solani более чем на **50%** было достигнуто при облучении в дозах выше **1800 Гр**, полное ингибирирование - выше **4500 Гр**.

2

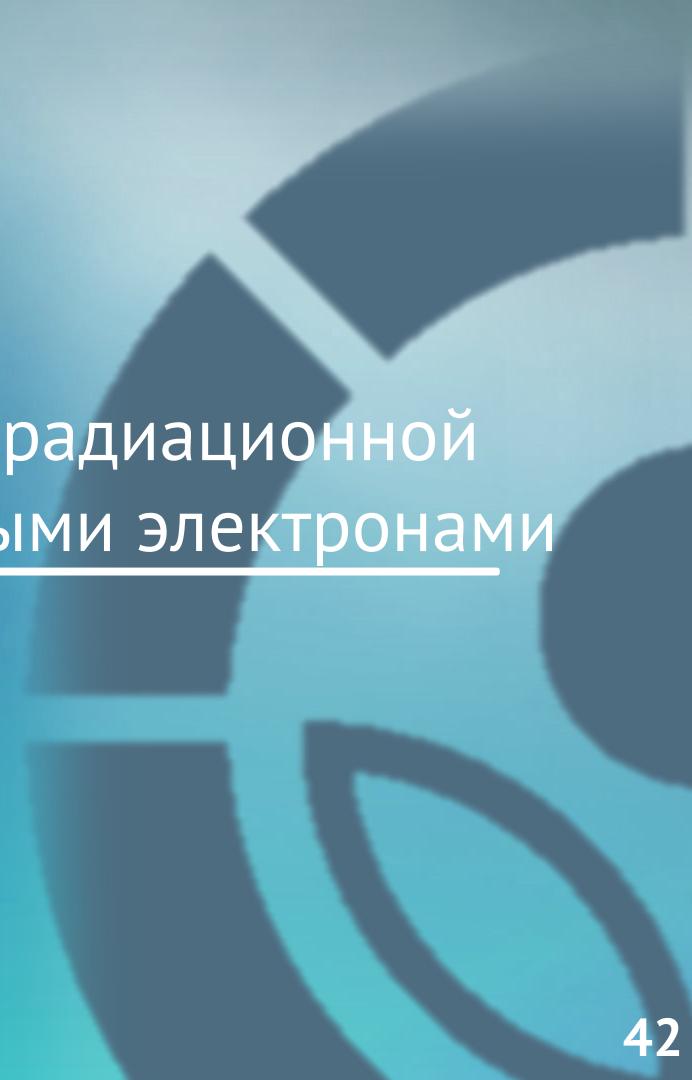
Предпосадочное поверхностное облучение клубней картофеля в дозах от **20 до 200 Гр** привело к **задержке** развития растений, а дозами выше **200 Гр** - к полному **ингибирированию** прорастания растений.

3

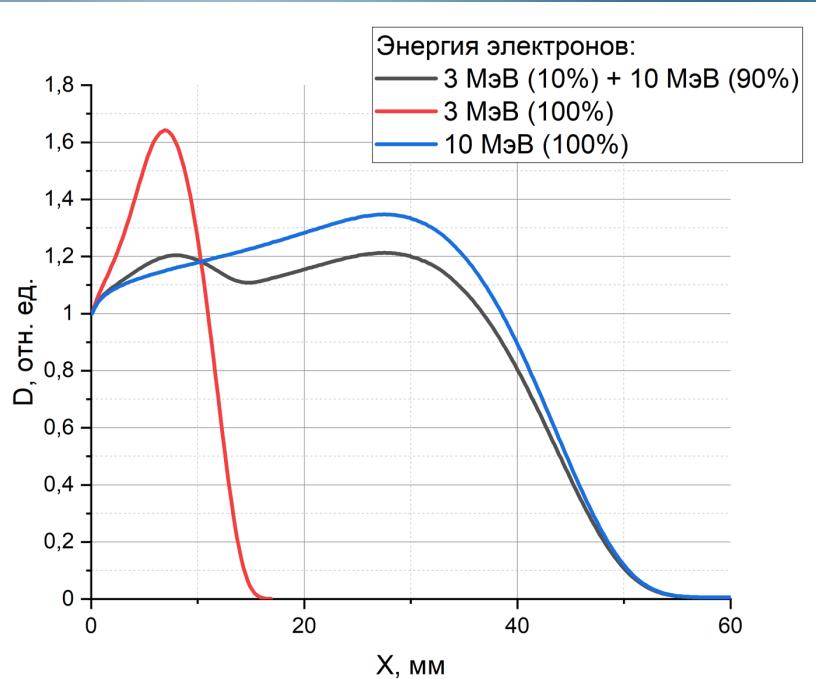
Поверхностная обработка картофеля в дозах **от 35 до 50 Гр** является наиболее эффективной для фитосанитарного контроля культуры картофеля.



Повышение эффективности радиационной обработки объектов ускоренными электронами



Причины неоднородности радиационной обработки ускоренными электронами

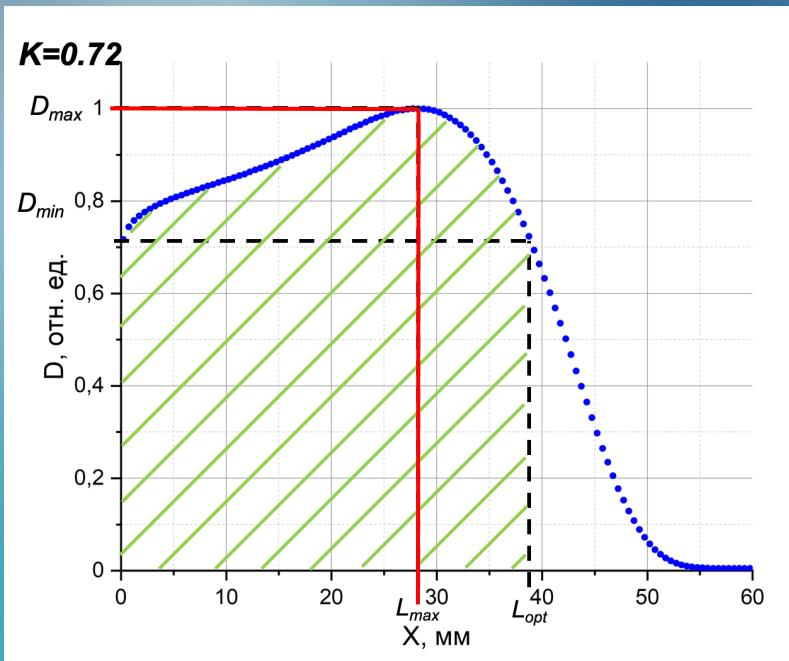


Зависимость поглощенной дозы D в слоях объекта из воды в форме параллелепипеда от глубины X при обработке электронами с энергией 3 МэВ и 10 МэВ

- 1 ➤ Характерное распределение дозы по глубине объекта;
- 2 ➤ Неоднородность плотности и химического состава вещества объекта;
- 3 ➤ Сложная геометрия объектов облучения;
- 4 ➤ Неоднородное распределение объектов в упаковке.

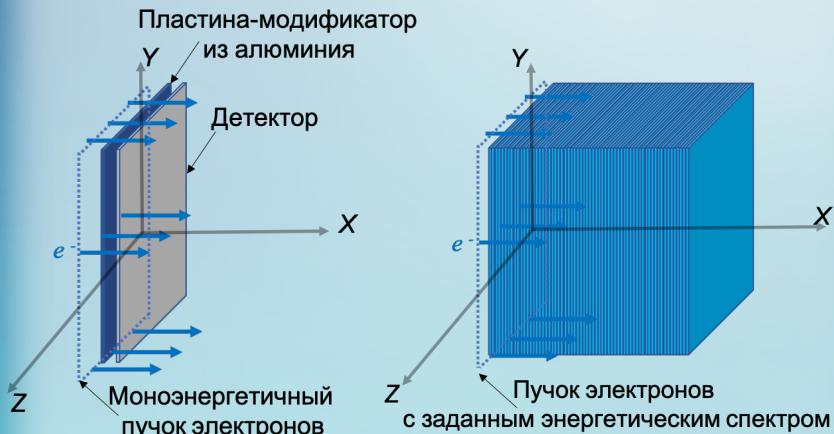
*Trends in radiation sterilization of health care products.
– Vienna : International Atomic Energy Agency, 2008*

Характеристики распределения поглощенной дозы по глубине объекта

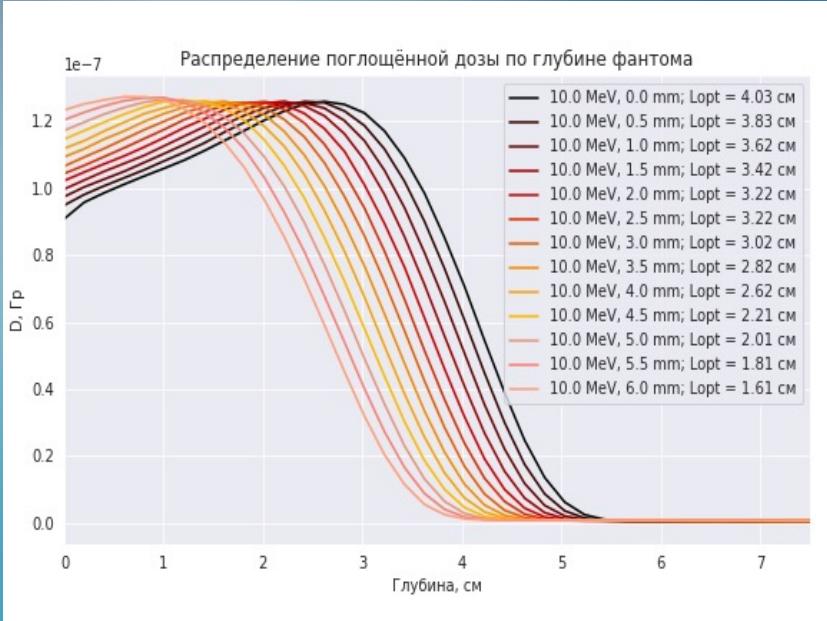


L_{opt} - оптимальная толщина обработки

$K = \frac{D_{min}}{D_{max}}$ - однородность обработки



Метод повышения однородности распределения дозы с использованием пластин-модификаторов из алюминия

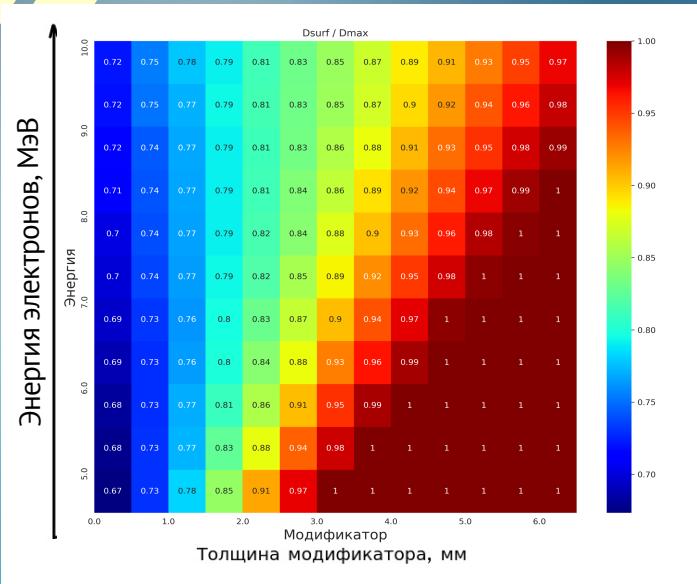


Распределение поглощённой дозы D (Гр) по глубине X (см) водного фантома в форме параллелепипеда при облучении электронами с энергией 10 МэВ при дополнительном размещении алюминиевой пластины-модификатора толщиной от 0.5 мм до 6.0 мм и без нее

Значения характеристик распределений поглощённой дозы с дополнительным размещением пластины-модификатора из алюминия и без нее

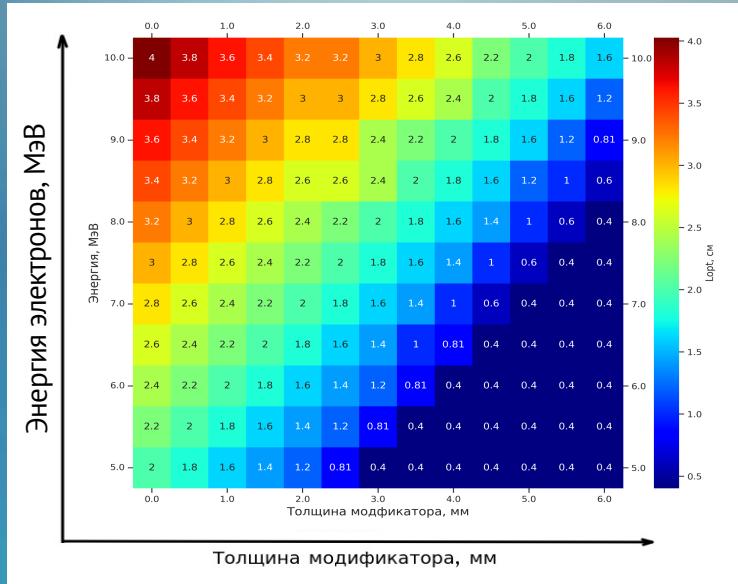
E_0 , МэВ	d, мм	$L_{opt,d}$, см	K_0 , отн. ед.	K_d , отн. ед.
10	0.0	3.875 ± 0.025	0.73 ± 0.01	-
	2.0	3.125 ± 0.025	0.73 ± 0.01	0.81 ± 0.02
	4.0	2.225 ± 0.025	0.76 ± 0.02	0.91 ± 0.02
	5.0	1.575 ± 0.025	0.82 ± 0.02	0.97 ± 0.02

Подбор оптимальных параметров обработки



Значения однородности K при облучении водного фантома толщиной L_{opt} электронами с энергией 5 – 10 МэВ при дополнительном размещении алюминиевой пластины толщиной от 0.5 мм до 6.0 мм и без нее

K – однородность обработки
 $L_{объекта} = L_{opt} (см)$ - толщина объекта



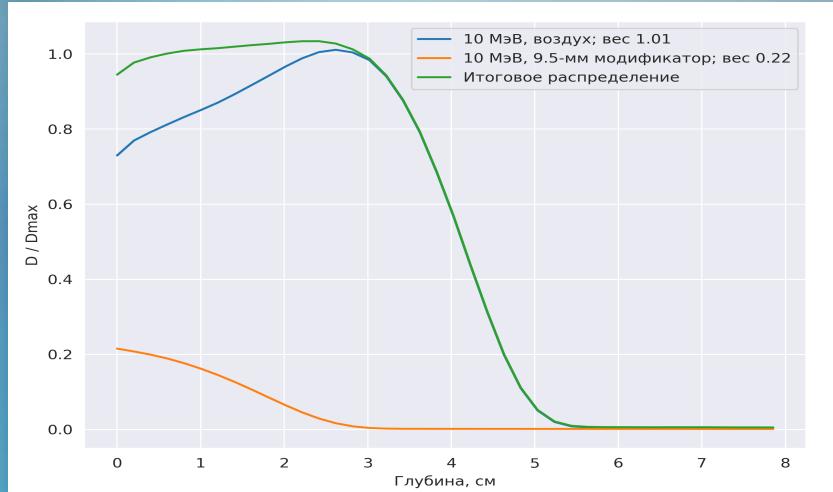
Значения оптимальной толщины водного фантома L_{opt} при облучении электронами с энергией 5 – 10 МэВ при дополнительном размещении алюминиевой пластины толщиной от 0.5 мм до 6.0 мм и без нее

E_0 (МэВ) – энергия электронов
 d (мм) – толщина пластины – модификатора

Метод комбинации пластин-модификаторов различной толщины

Значения распределения поглощённой D (отн.ед.) по глубине X (см) водного фантома при облучении электронами с энергией 10 МэВ при дополнительном размещении пластин из алюминия различной толщины и без них

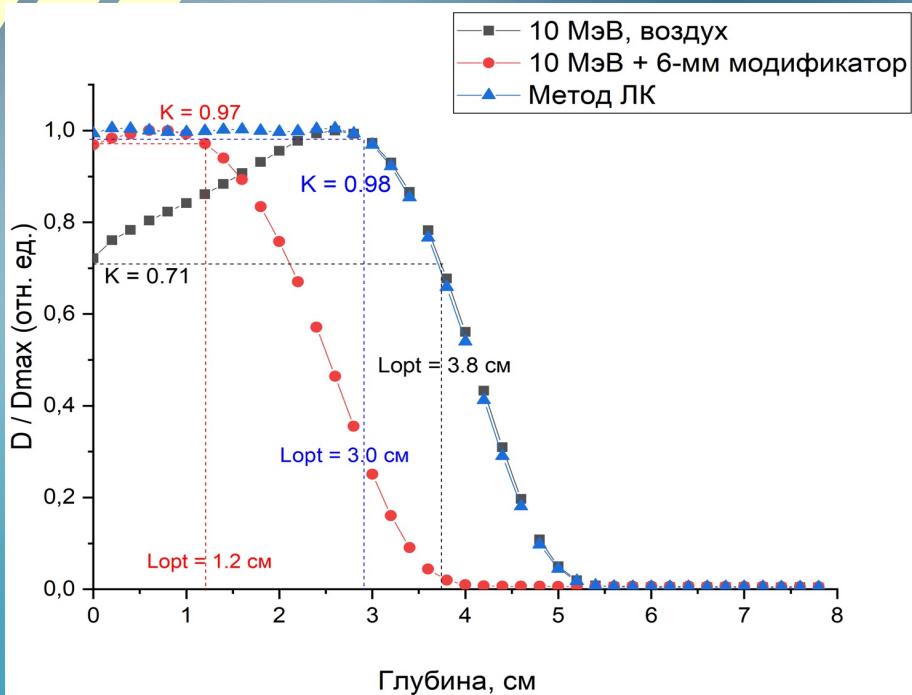
X глубина , см	10 МэВ								
	возду х	0.5 мм	1.0 мм	1.5 мм	2.0 мм	2.5 мм	3.0 мм	...	
0	7,55E-01	7,76E-01	7,86E-01	7,95E-01	8,13E-01	8,31E-01	8,49E-01	...	
0,2	7,96E-01	8,02E-01	8,10E-01	8,17E-01	8,33E-01	8,51E-01	8,71E-01	..	
0,4	8,20E-01	8,23E-01	8,29E-01	8,38E-01	8,52E-01	8,71E-01	8,91E-01	...	
0,6	8,41E-01	8,43E-01	8,47E-01	8,57E-01	8,71E-01	8,92E-01	9,13E-01	...	
0,8	8,61E-01	8,62E-01	8,69E-01	8,76E-01	8,93E-01	9,14E-01	9,36E-01	...	
1	8,81E-01	8,84E-01	8,90E-01	8,99E-01	9,15E-01	9,36E-01	9,56E-01	...	
1,2	9,01E-01	9,05E-01	9,12E-01	9,21E-01	9,39E-01	9,60E-01	9,76E-01	...	
1,4	9,24E-01	9,28E-01	9,36E-01	9,44E-01	9,59E-01	9,78E-01	9,90E-01	...	
1,6	9,49E-01	9,54E-01	9,60E-01	9,65E-01	9,81E-01	9,93E-01	9,99E-01	...	
1,8	9,74E-01	9,78E-01	9,82E-01	9,85E-01	9,96E-01	1,00E+00	1,00E+00	...	
2	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	...	
...	



Зависимость распределения поглощенной дозы D (отн.ед.) по глубине X (см) водного параллелепипеда при обработке электронами с энергией 10 МэВ с использованием пластин из алюминия различной толщины

$$\sum_{i=1}^M \left(\sum_{j=1}^N \omega_i D_{ij} - \text{const} \right)^2 \rightarrow \text{Min}$$

Сравнение применения одной пластины и комбинации пластин



Распределение поглощённой дозы D (отн.ед.) по глубине X (см) водного фантома в форме параллелепипеда при облучении электронами с энергией 10 МэВ при размещении пластины толщиной 6 мм, при размещении комбинации алюминиевых пластин толщиной от 0.5 мм до 6.0 мм и без пластиин

Значение коэффициента однородности K при одностороннем облучении водного параллелепипеда толщиной от 1.9 см до 3.4 см электронами с энергией 10 МэВ с использованием комбинации пластин и без них

Толщина фантома, см	K без пластин, отн.ед.	K лучший модификатор, отн.ед.	K комбинация пластин, отн.ед.
1.60	0.805 ± 0.005	0.941 ± 0.023	0.958 ± 0.025
1.80	0.783 ± 0.013	0.902 ± 0.003	0.947 ± 0.002
2.00	0.761 ± 0.003	0.907 ± 0.002	0.937 ± 0.017
2.20	0.742 ± 0.023	0.895 ± 0.011	0.927 ± 0.005
2.40	0.726 ± 0.006	0.871 ± 0.021	0.917 ± 0.015
2.60	0.719 ± 0.011	0.850 ± 0.023	0.899 ± 0.011
2.80	0.719 ± 0.012	0.832 ± 0.006	0.888 ± 0.014
3.00	0.719 ± 0.021	0.810 ± 0.012	0.872 ± 0.021
3.20	0.719 ± 0.005	0.782 ± 0.001	0.850 ± 0.013
3.40	0.719 ± 0.004	0.752 ± 0.006	0.804 ± 0.013

Система планирования радиационной обработки объектов

Загруженный спектр

Energy E, MeV

Mode 1 (blue), Mode 2 (orange), Mode 3 (yellow), Mode 4 (purple)

Тип излучения

e-
 gamma

Энергетический спектр

/path/to/spectra.xlsx

Состав и плотность объекта

Материал

Плотность г / см³

Геометрия объекта

Форма

Линейные размеры

ix см
iy см
iz см

100%

10.00 MeV; depth = 2.01 cm; k = 0.94

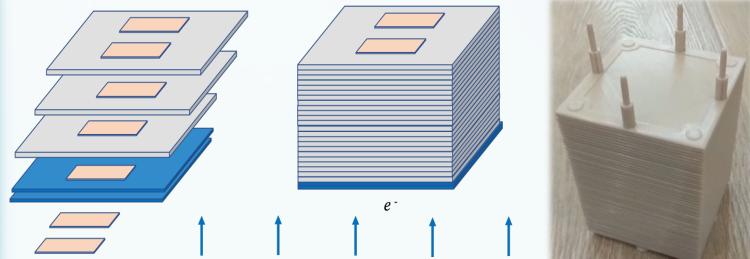
V / Vsum

D / Dmax

depth, cm

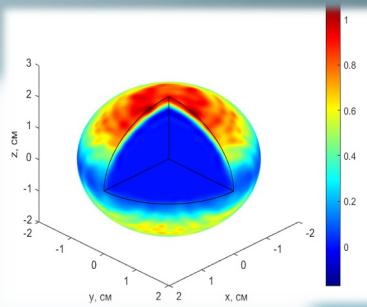
Пространственное распределение поглощенной дозы в объекте

- ✓ геометрия объекта
- ✓ элементный состав
- ✓ плотность

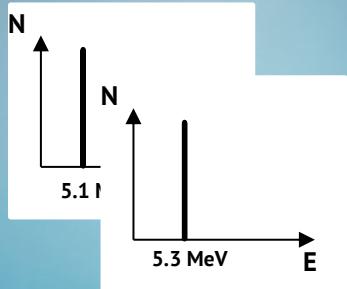


- ✓ схема облучения
- ✓ энергетический спектр пучка

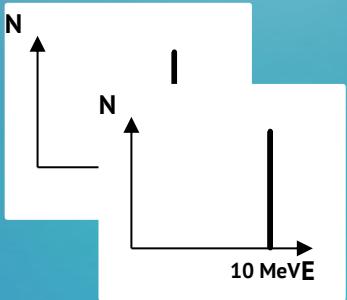
- ✓ моделирование источника с помощью Geant 4;
- ✓ прямое измерение энергетического спектра с использованием специального оборудования;
- ✓ косвенный метод, основанный на реконструкции спектра по экспериментальным данным.



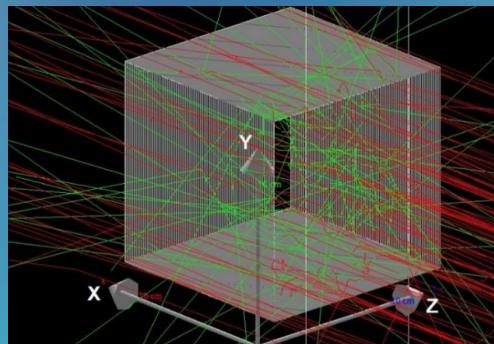
Восстановление энергетического спектра пучка по известному распределению поглощенной дозы в веществе



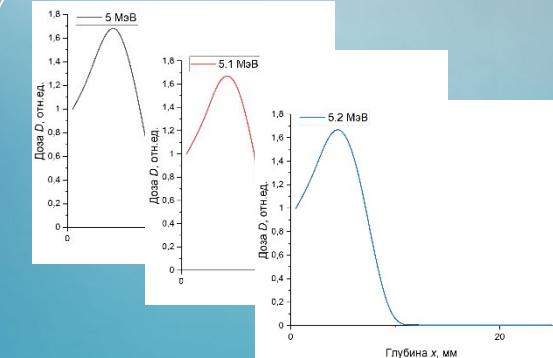
...



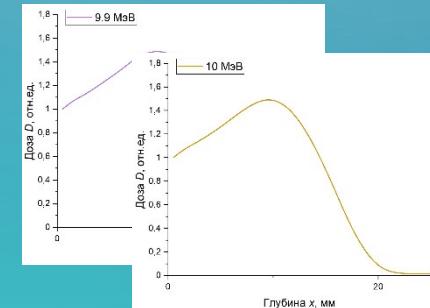
Моделирование дозовых распределений в алюминии для набора моноэнергетических пучков электронов с энергией от 5 МэВ до 10 МэВ



Подбор линейной комбинации моноэнергетических пучков электронов таким образом, что суммарное дозовое распределение наилучшим образом приближает известное дозовое распределение



...



Алгоритм реконструкции спектра излучения ускорителя по глубинным дозовым распределениям в известном веществе

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

$$\downarrow \\ D = df$$

$$D_i = \sum_{j=1}^M d_{ij} \cdot f_j$$

$$\begin{cases} \min_f(\theta[f]) \\ \theta[f] = \|S^{\frac{1}{2}}(D - df)\|^2 \end{cases}$$

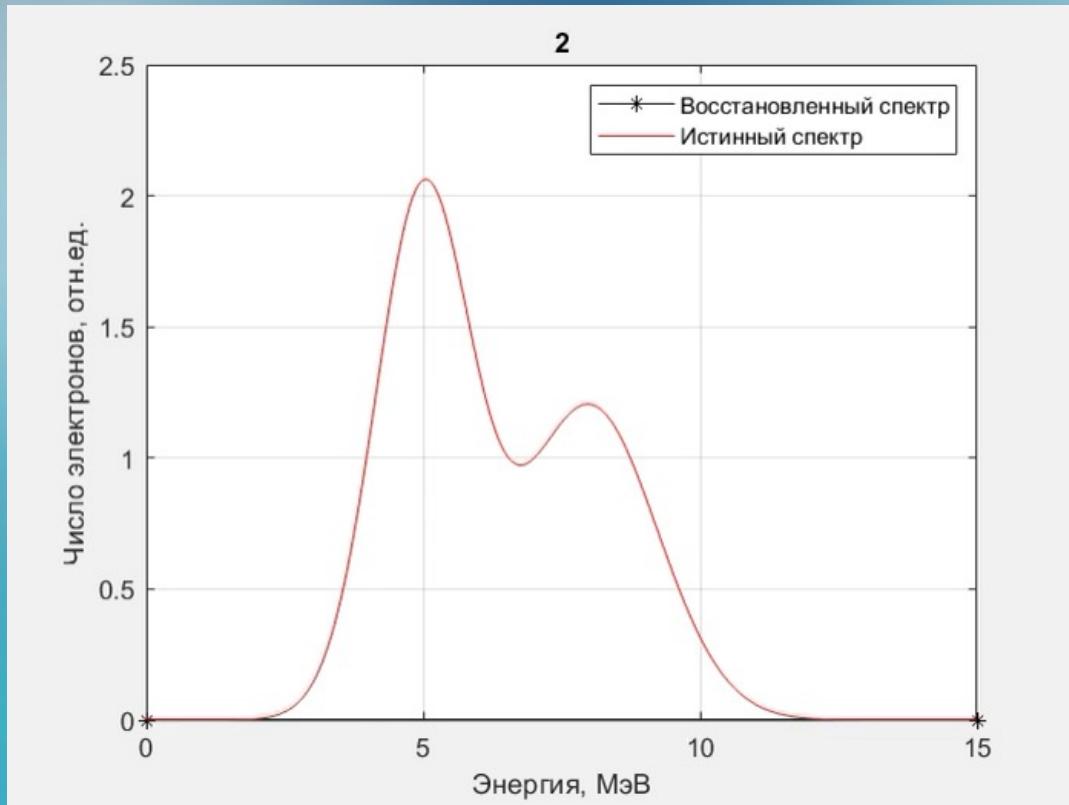
1

➤ распределение поглощенной дозы, создаваемое пучком электронов с некоторым спектром

2

➤ значение поглощенной дозы в точке с координатой x_i , создаваемое пучком с некоторым распределением, которое разложено по базисным функциям с весами f_j .

Проблема ограничения максимально допустимого количества базисных функций, вызванного погрешностью измерения дозовых распределений



$$D_{exp} = D + \delta D_{exp}$$

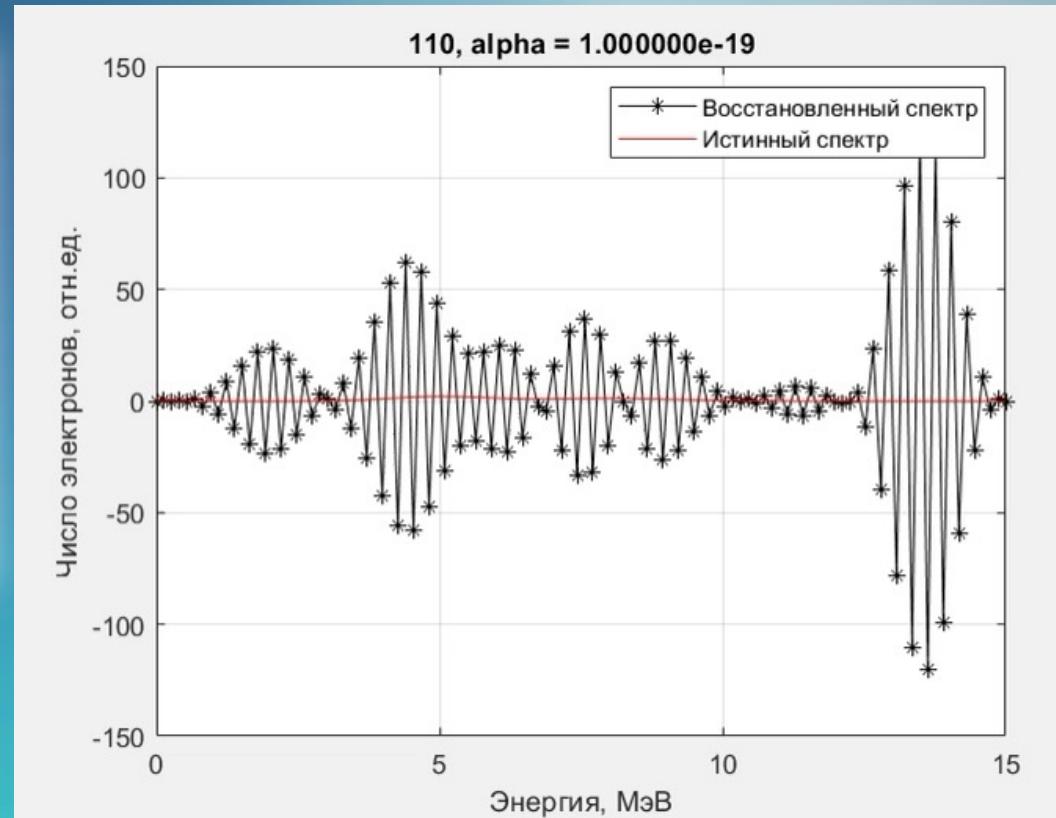
Алгоритм реконструкции спектра излучения ускорителя по глубинным дозовым распределениям в известном веществе, дополненное регуляризацией Тихонова

$$\begin{cases} \min_f(\theta[f]) \\ \theta[f] = \|S^{\frac{1}{2}}(D_{exp} - df)\|^2 + \alpha\|f\|^2 \end{cases}$$

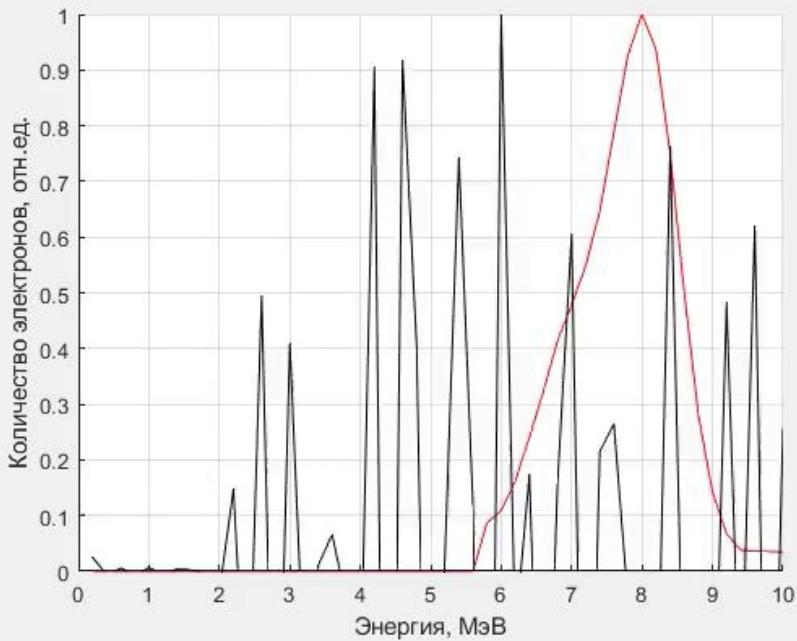


$$f_{rest}(\alpha) = (d^T S d + \alpha E)^{-1} d^T S D_{exp}$$

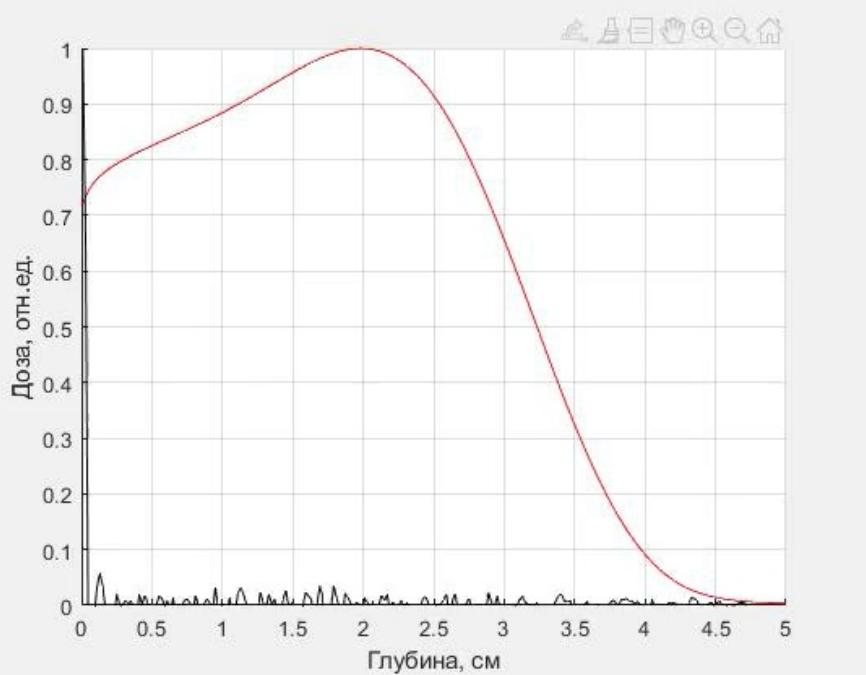
Демонстрация восстановления спектра ускорителя путем алгоритма с дополнением регуляризации Тихонова



Демонстрация восстановления спектра и соответствующего распределения поглощенной дозы в воде



Восстанавливаемый спектр пучка электронов



Распределение поглощенной дозы в воде с учетом восстановленного спектра в алюминии

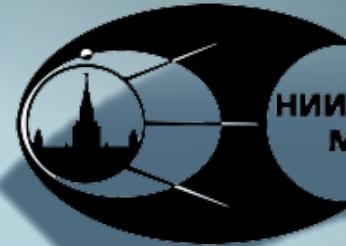
Выводы

1

Разработанный **метод модификации пучка** электронов с применением **комбинации пластин-модификаторов** из алюминия позволяет увеличить однородность обработки до 95 % для объектов толщиной до 4 см.

2

Показана достаточная **эффективность метода регуляризации Тихонова** для задач **синтеза спектров** с заданными дозовыми распределениями. Точность реконструкции глубинных дозовых распределений составляет порядка 85-95%.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

Контактные данные:

Близнюк Ульяна Александровна – старший
преподаватель ФУиРМ ФФ МГУ, снс НИИЯФ МГУ

E-mail: uabliznyuk@gmail.com
Тел: +7(495)939-13-44