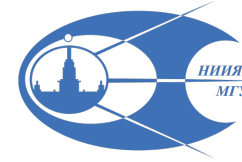


Физический и Химический
факультеты Московского
государственного университета
имени М.В. Ломоносова



Научно-исследовательский институт
ядерной физики имени Д.В.
Скобелева Московского
государственного университета имени
М.В. Ломоносова

Оптимизация радиационной обработки биообъектов

Близнюк У.А., Беклемишев М.К., Борщеговская П.Ю., Болотник Т.А., Браун А.В.,
Золотов С.А., Зубрицкая Я.В., Ипатова В.С., Малюга А.А., Межетова И.Т.,
Никитина З.К., Никитченко А.Д., Студеникин Ф.Р.,
Чуликова Н.С., Юров Д.С., Козлова Е.К., Родин И.А., Черняев А.П.

Москва, 2024

Глобальные проблемы пищевой индустрии и здравоохранения



Проблемы пищевой индустрии и здравоохранения

- Смертность от кишечных заболеваний ~ **1,5 млн человек/год**
<https://www.who.int>
- Пищевые отравления ~ **600 млн человек/год**
<https://www.who.int>
- Потери продукции из-за микробиологической порчи ~ **1,05 млрд тонн /год**
<https://www.unep.org>

Задачи радиационной обработки

- ✓ Подавление патогенов
- ✓ Дезинсекция сельскохозяйственных культур
- ✓ Подавление прорастания корнеплодов
- ✓ Задержка созревания фруктов
- ✓ Продление сроков хранения продукции путем подавления микроорганизмов
- ✓ Стерилизация продукции особого назначения



Проблемы, требующие решения

Обеспечение однородности облучения

Обеспечение безопасности радиационной обработки

Определение эффективных диапазонов доз для различных категорий пищевой продукции

Идентификация облученной пищевой продукции

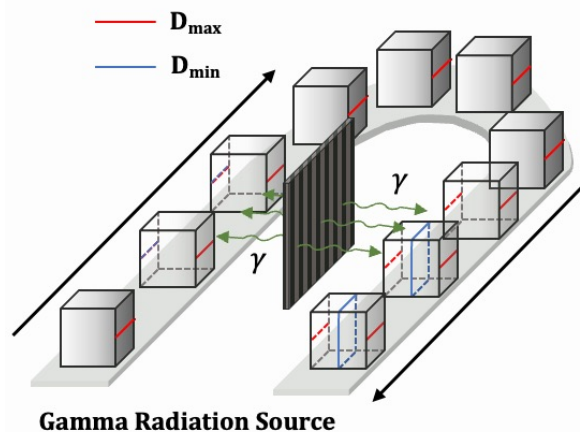
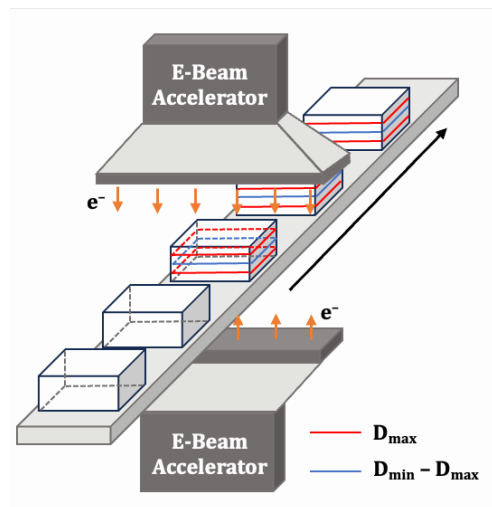
Установление доз облучения для подавления широкого спектра патогенов

Интеграция процесса радиационной обработки в пищевое производство

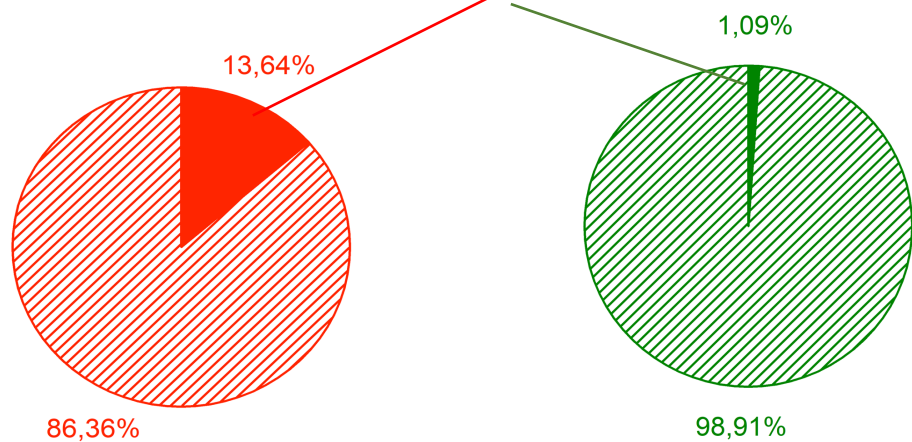
Промышленные центры радиационной обработки в России

Ускорители электронов

Гамма источники



Россия



Основные центры

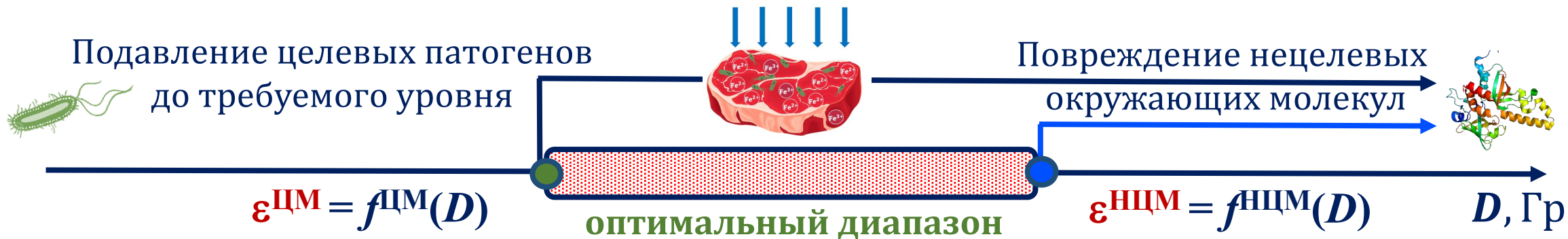
Organization	Irradiator	Type Irradiators	Energy
NIIEFA ROSATOM	E-Beam	S-band linac	5 MeV
RAD	E-Beam	S-band linac	5-10 MeV
Axenter	E-Beam	S-band linac L-band linac	10 MeV 10 MeV
CORAD	E-Beam	S-band linac	5-10 MeV
Ural Federal University ROSATOM	E-Beam	S-band linac S-band linac S-band linac	0.5 MeV 1 MeV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



Результаты

Оптимальный диапазон доз

Оценка эффективности ε повреждения мишеней в биообъекте



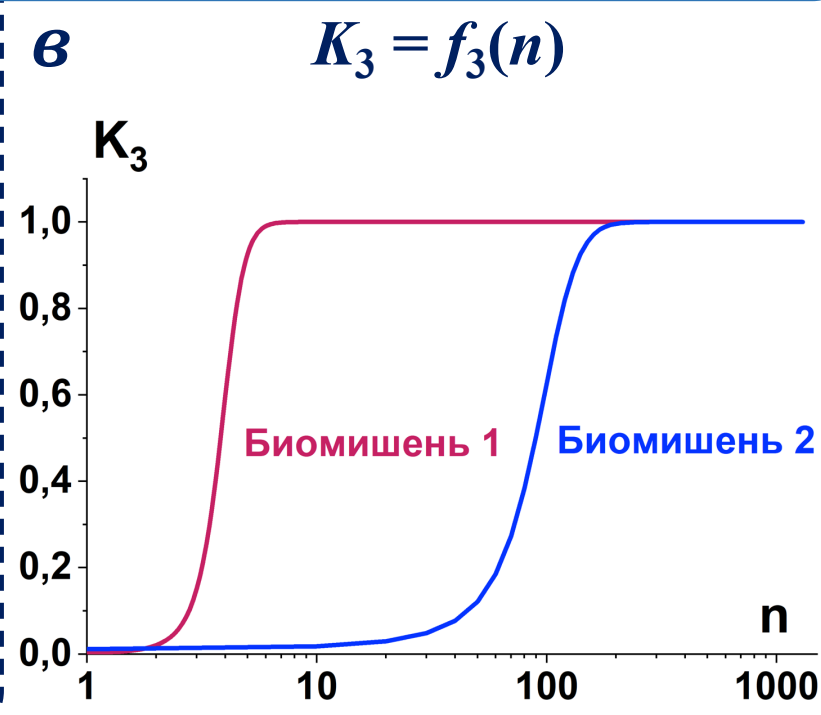
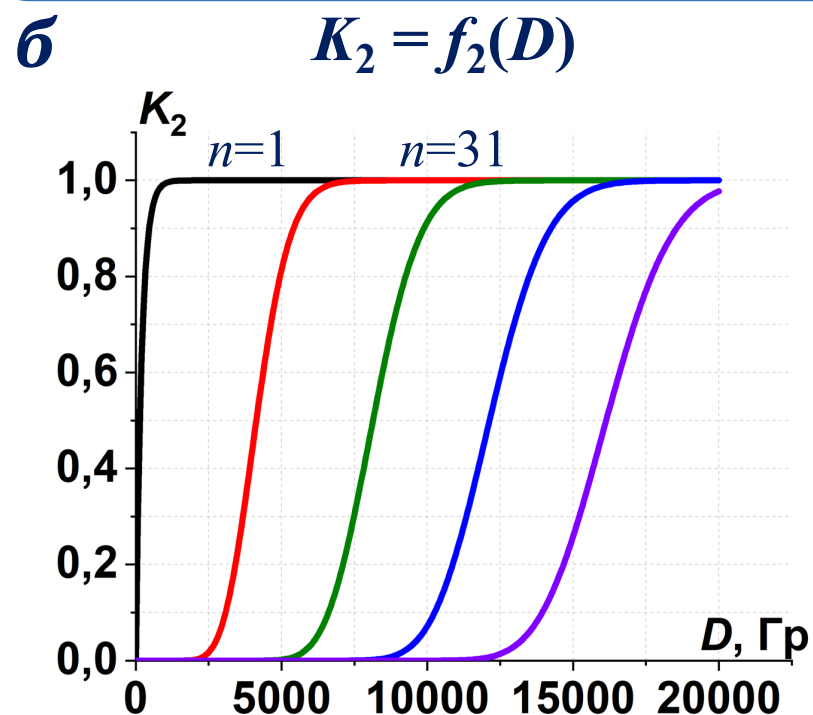
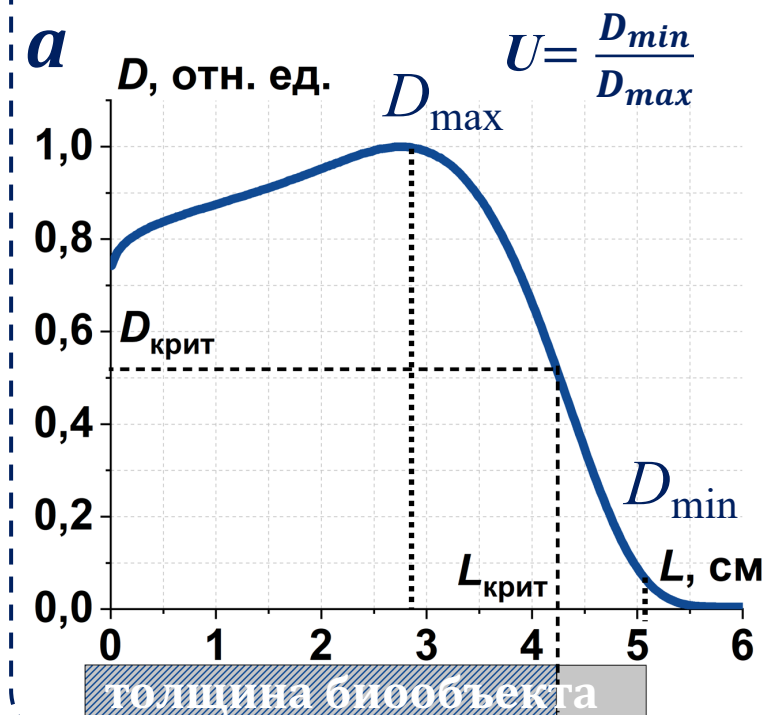
Излучение

K_1

K_2

K_3

Биомишень

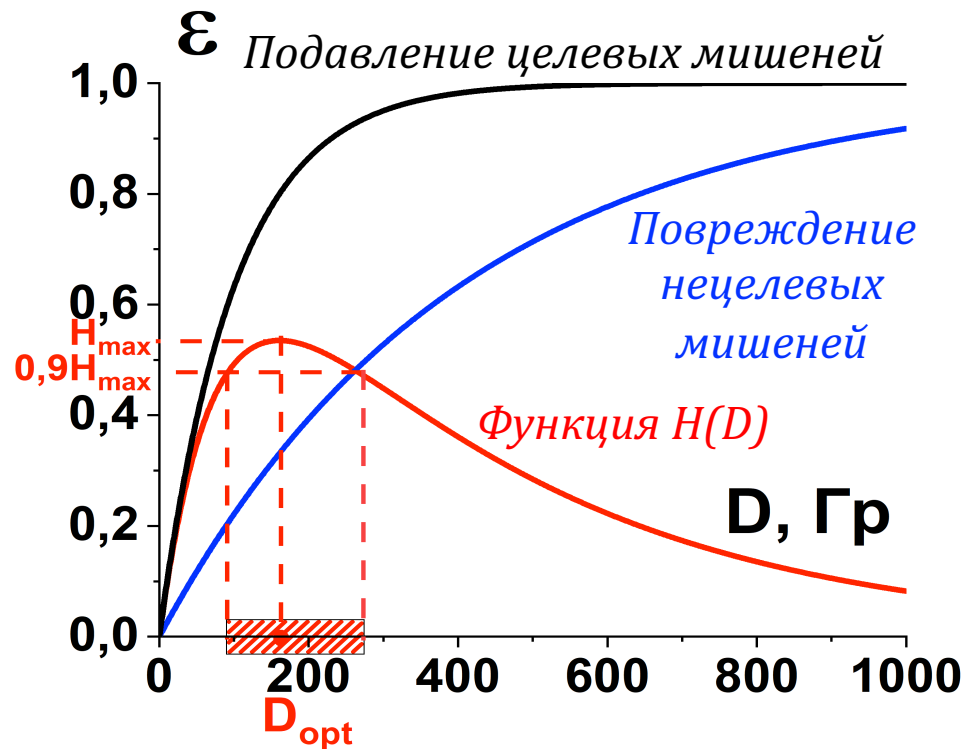


Комплексный подход к установлению границ оптимального диапазона доз. Модель

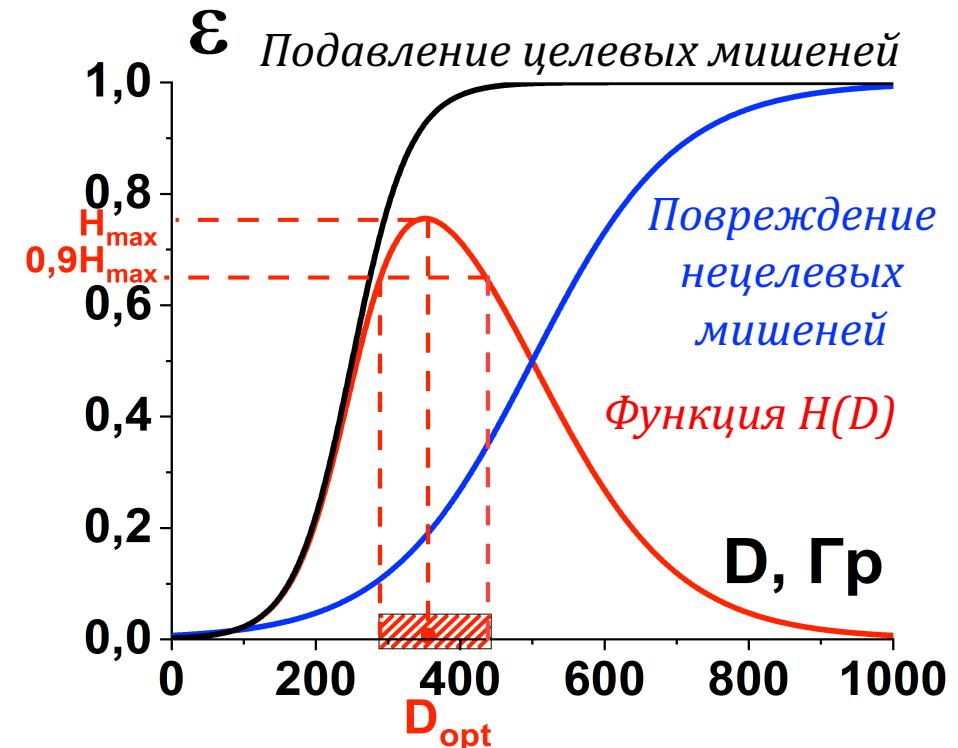
$$\text{Функция оптимизации } H(D) = \varepsilon^{\text{ЦМ}}(D) \cdot (1 - \varepsilon^{\text{НЦМ}}(D))$$

Экспоненциальная (слева) и сигмоидальная (справа) зависимости повреждения биомишеней $\varepsilon(D)$

$$\varepsilon(D) = K_1(D) \cdot K_2(D) = K_1(D) \cdot (1 - e^{-\alpha D})$$

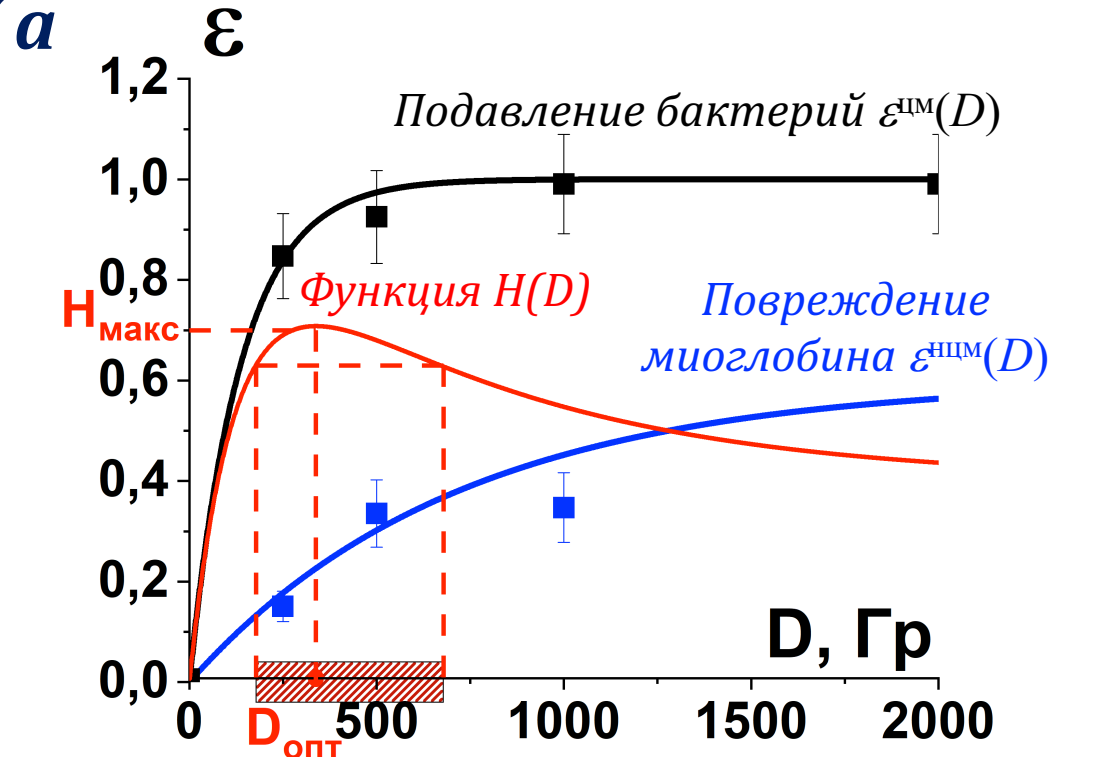


$$\varepsilon(D) = K_1(D) \cdot K_3(D) = K_1(D) \cdot \frac{1}{1 + e^{-\frac{D-\bar{D}}{\sigma}}}$$



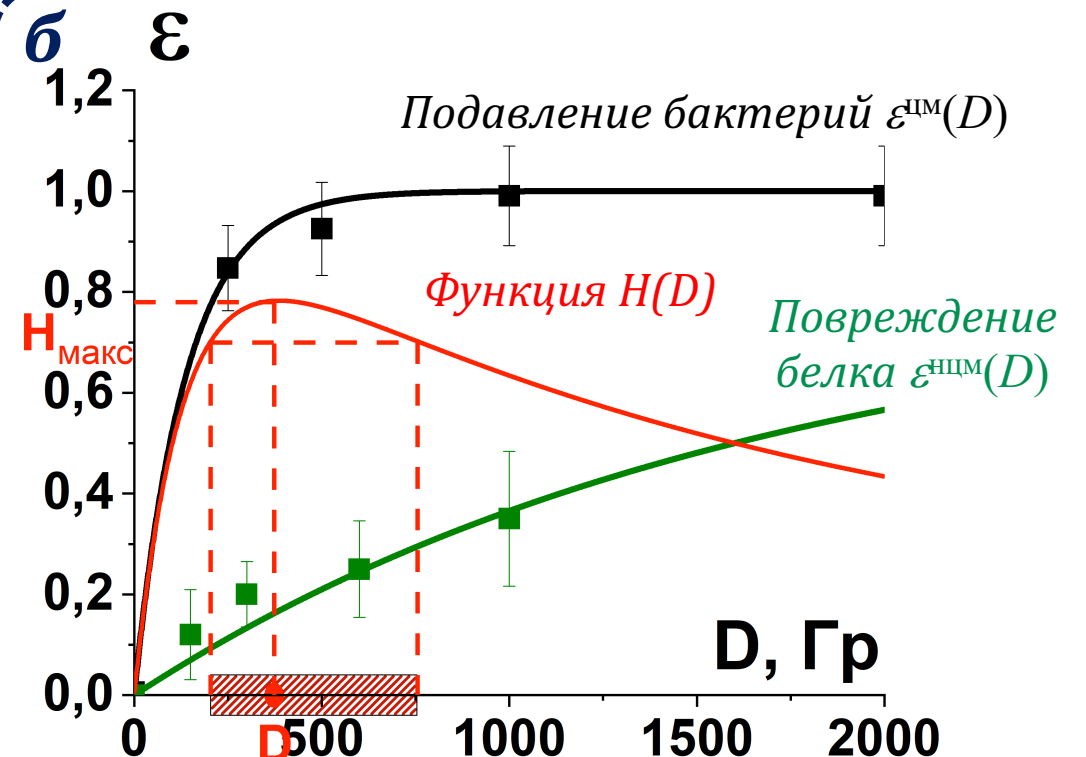
Оптимальный диапазон доз радиационной обработки продукции животного происхождения

$$H(D) = \varepsilon^{ЦМ}(D) \cdot (1 - \varepsilon^{НЦМ}(D))$$



Оптимальный диапазон 220–854 Гр

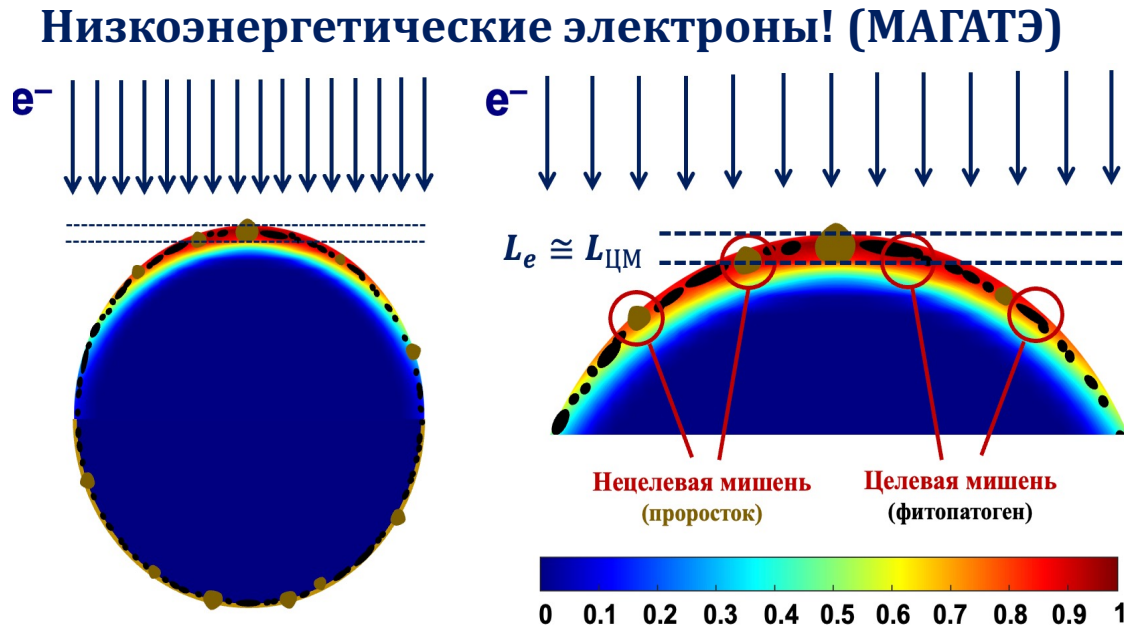
Зависимости эффективности повреждения микроорганизмов $\varepsilon^{ЦМ}(D)$ и миоглобина $\varepsilon^{НЦМ}(D)$ в образцах говядины от дозы



Оптимальный диапазон 204–755 Гр

Зависимости эффективности повреждения микроорганизмов $\varepsilon^{ЦМ}(D)$ и структуры белка БСА $\varepsilon^{НЦМ}(D)$ в модельной системе от дозы

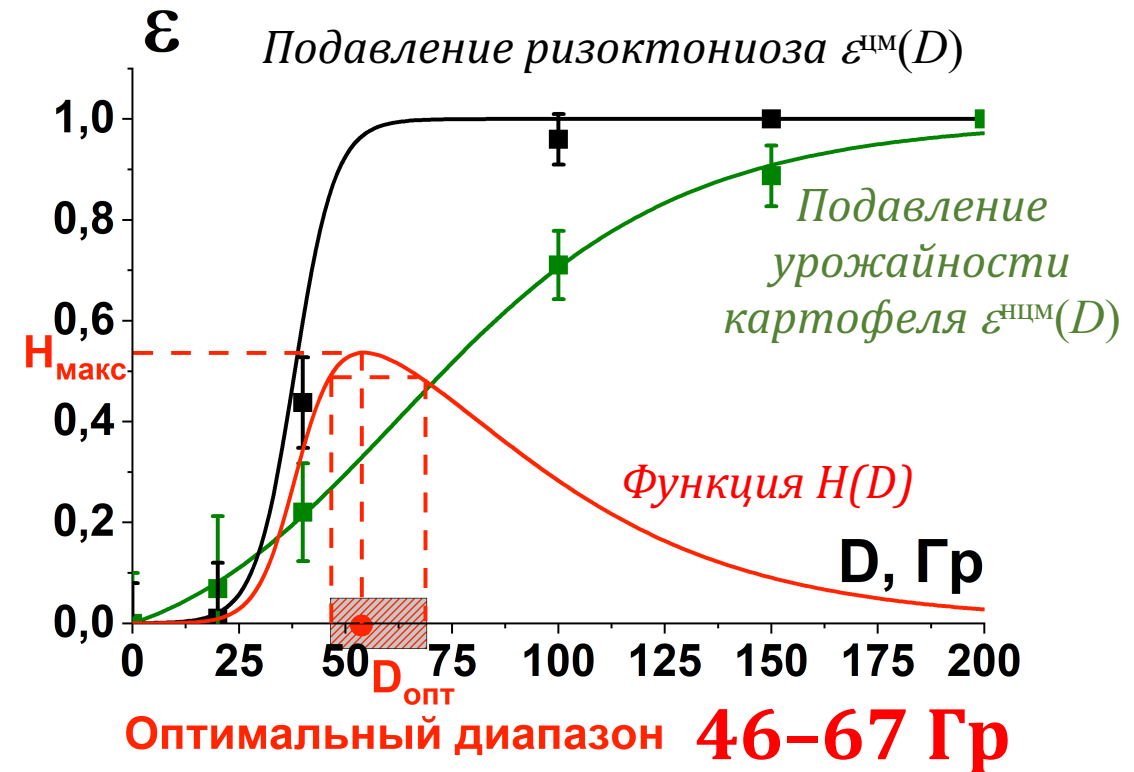
Оптимальный диапазон доз радиационной обработки сельскохозяйственной продукции



Карта распределения поглощенной дозы при обработке пучком электронов 1 МэВ водной сферы диаметром 4 см

$$H(D) = \varepsilon^{ЦМ}(D) \cdot (1 - \varepsilon^{НЦМ}(D))$$

$$\varepsilon^{ЦМ}(D) = K_1 \cdot K_3(D) = K_1 \cdot \frac{1}{1 + e^{-\frac{D-\bar{D}}{\sigma}}}$$



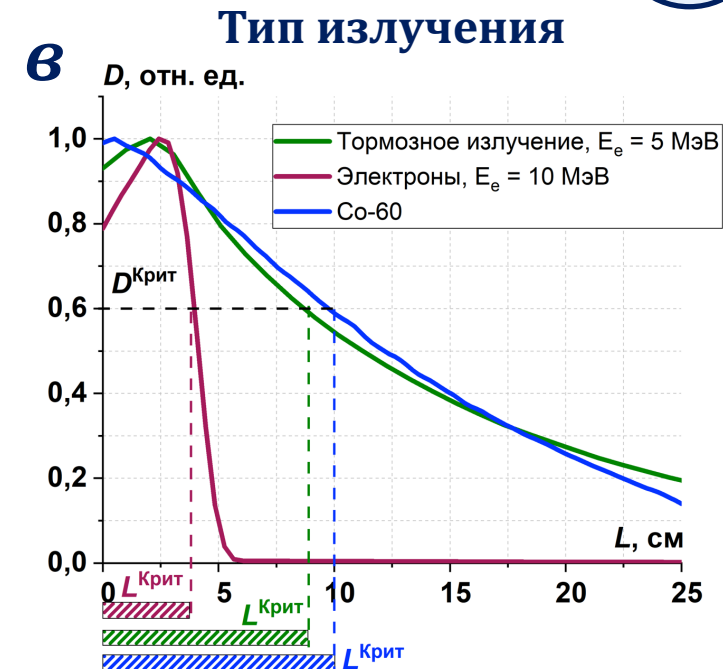
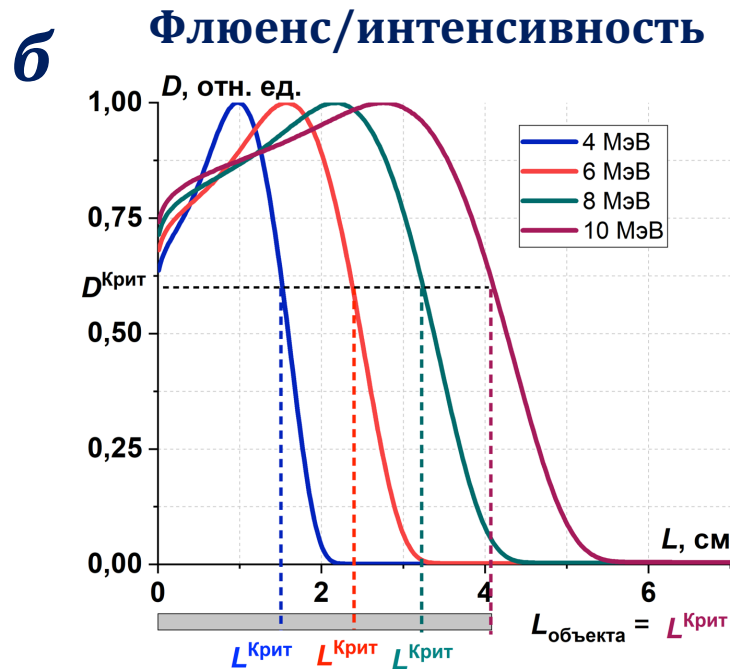
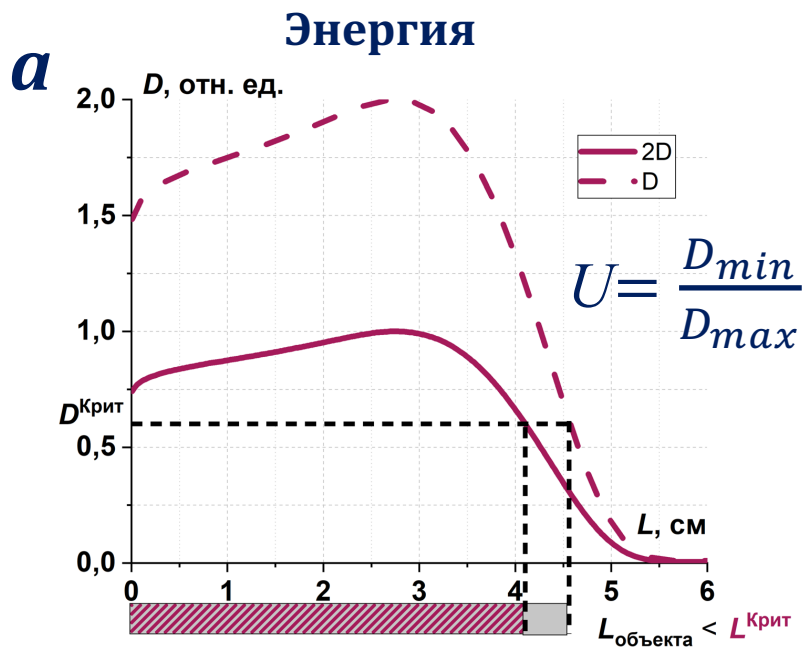
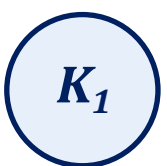
Зависимости эффективности **подавления ризоктониоза $\varepsilon^{ЦМ}(D)$** и **прорастания картофеля $\varepsilon^{НЦМ}(D)$** от дозы обработки семенного картофеля

Биомишень	$\bar{D}, \text{ Гр}$	$\sigma, \text{ Гр}^{-1}$	K_1
Проростки	$53,0 \pm 0,8$	$11,0 \pm 0,7$	1
Ризоктониоз	$38,0 \pm 0,3$	$4,6 \pm 0,5$	1

Результаты

Расчет оптимальных параметров излучения

Расчеты оптимальных параметров излучения



Распределения поглощенной дозы в воде при облучении: **а** — электронами с энергией $E_e = 10$ МэВ в дозе D и в дозе $2D$; ; **б** — электронами с энергией $E_e = 4$ МэВ, $E_e = 6$ МэВ, $E_e = 8$ МэВ и $E_e = 10$ МэВ; **в** — электронами с энергией $E_e = 10$ МэВ, тормозными фотонами ($E_e = 5$ МэВ, мишень 2 мм из тантала) и гамма-излучением ^{60}Co

$$E_e [\text{МэВ}] = \frac{L_{объекта} [\text{см}] \cdot \rho_{объекта}^{0,96}}{4 [\text{см}^{-1,88} \cdot \text{г}^{0,96} \cdot \text{МэВ}^{-1}]} + \frac{159}{400} [\text{МэВ} \cdot \text{г}^{-0,5} \cdot \text{см}^{-1,5}] \sqrt{\rho_{объекта}}$$

Тормозные фотоны

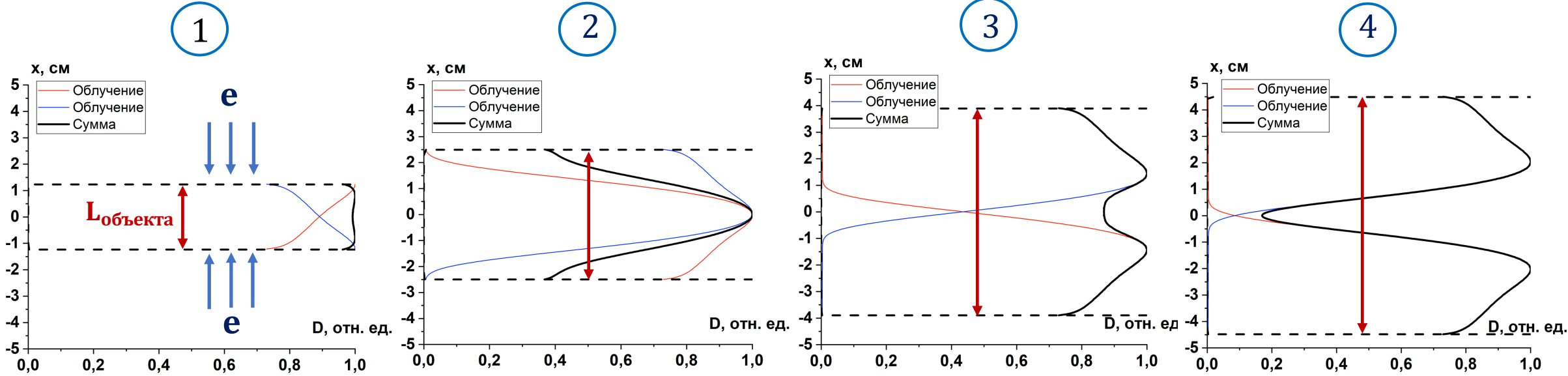
$$U = 0,01 [\text{МэВ}^{-1}] \cdot E_e [\text{МэВ}] + 0,57 \quad \text{Электроны}$$

$$E_e [\text{МэВ}] \geq \frac{\left[-L_{объекта} [\text{см}] \frac{\rho_{объекта} [\text{г} \cdot \text{см}^{-3}]}{\log(U) \rho_0 [\text{г} \cdot \text{см}^{-3}]} - 10 [\text{см}] \right]}{0,6 [\text{см} \cdot \text{МэВ}^{-1}]}$$

Влияние параметров излучения на распределение поглощенной дозы в биообъекте с заданной толщиной L

K_1

Распределения поглощенной дозы в воде при двустороннем облучении электронами с энергией $E_e = 10$ МэВ



Зависимости между **толщиной объекта**, при которой достигается максимум/минимум однородности U и энергией электронов E_e

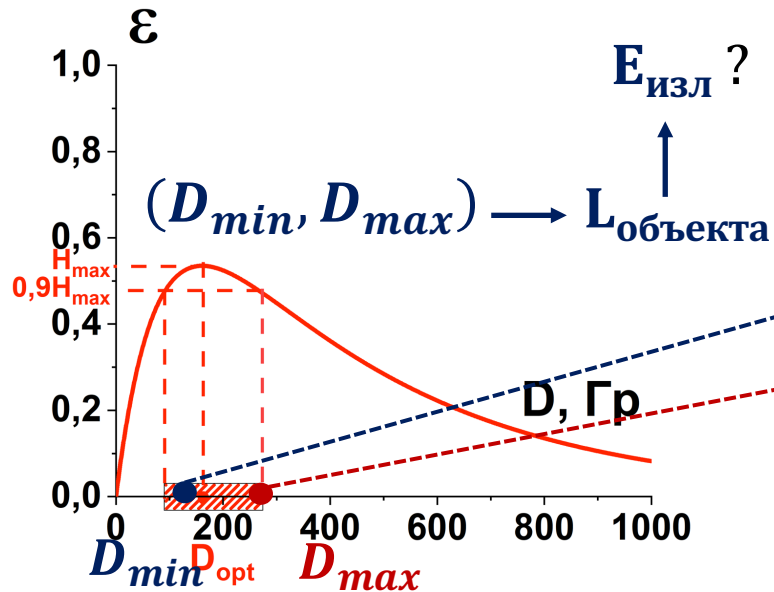
$$L_{\text{объекта}1-2} [\text{см}] = 0,273 [\text{см} \cdot \text{МэВ}^{-1}] * E_e [\text{МэВ}] \quad L_{\text{объекта}} \leq 2,5 \text{ см} \quad U \geq 0,9$$

$$L_{\text{объекта}2-3} [\text{см}] = 0,551 [\text{см} \cdot \text{МэВ}^{-1}] * E_e [\text{МэВ}] \quad 2 \text{ см} \leq L_{\text{объекта}} \leq 4 \text{ см} \quad U \leq 0,4$$

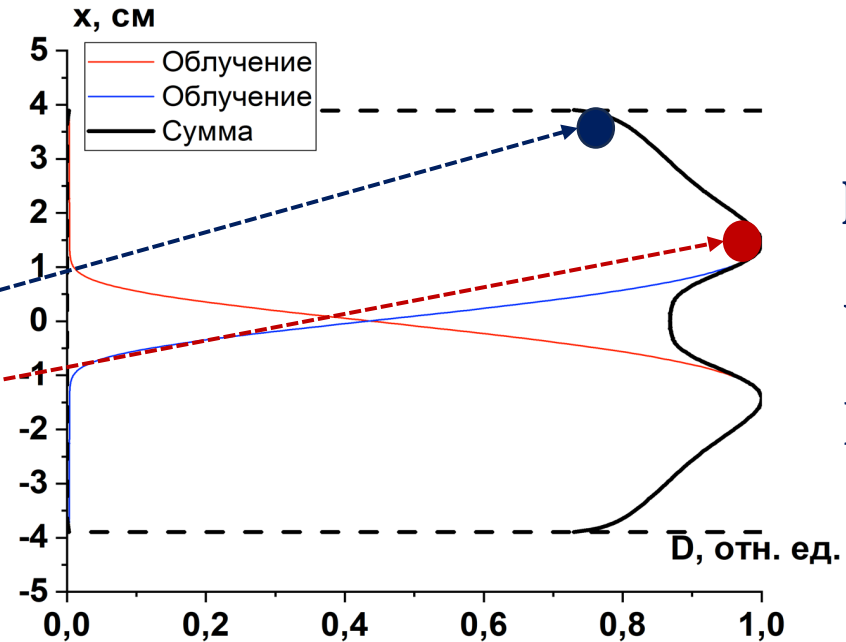
$$L_{\text{объекта}3-4} [\text{см}] = 0,847 [\text{см} \cdot \text{МэВ}^{-1}] * E_e [\text{МэВ}] \quad 6 \text{ см} \leq L_{\text{объекта}} \leq 6 \text{ см} \quad 0,6 \leq U \leq 0,8$$

Планирование радиационной обработки биообъектов

Этап 1 Экспериментальное определение границ оптимального диапазона доз



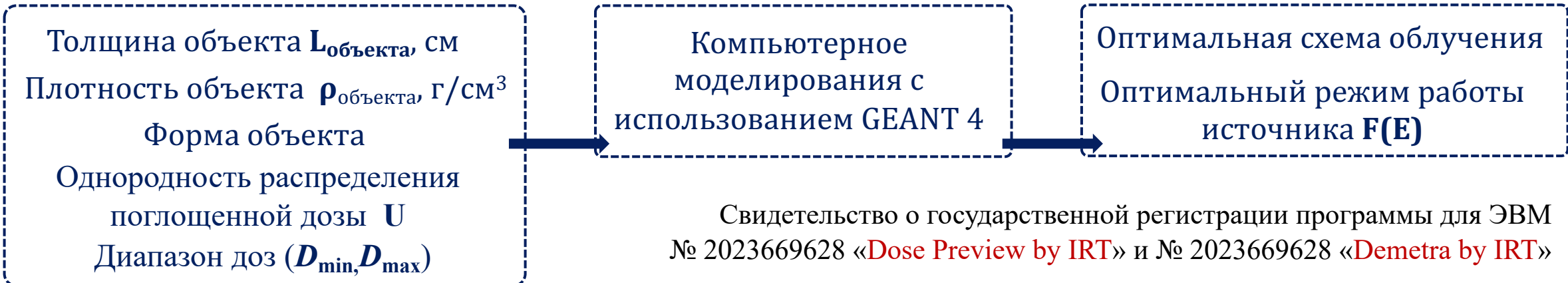
Этап 2 Компьютерное моделирование для расчета оптимальных параметров излучения (тип излучения, энергия, схема облучения)



$L_{объекта} = 8$ см

$U = 0,8$

$E_e = 10$ МэВ



Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023669628 «Dose Preview by IRT» и № 2023669628 «Demetra by IRT»

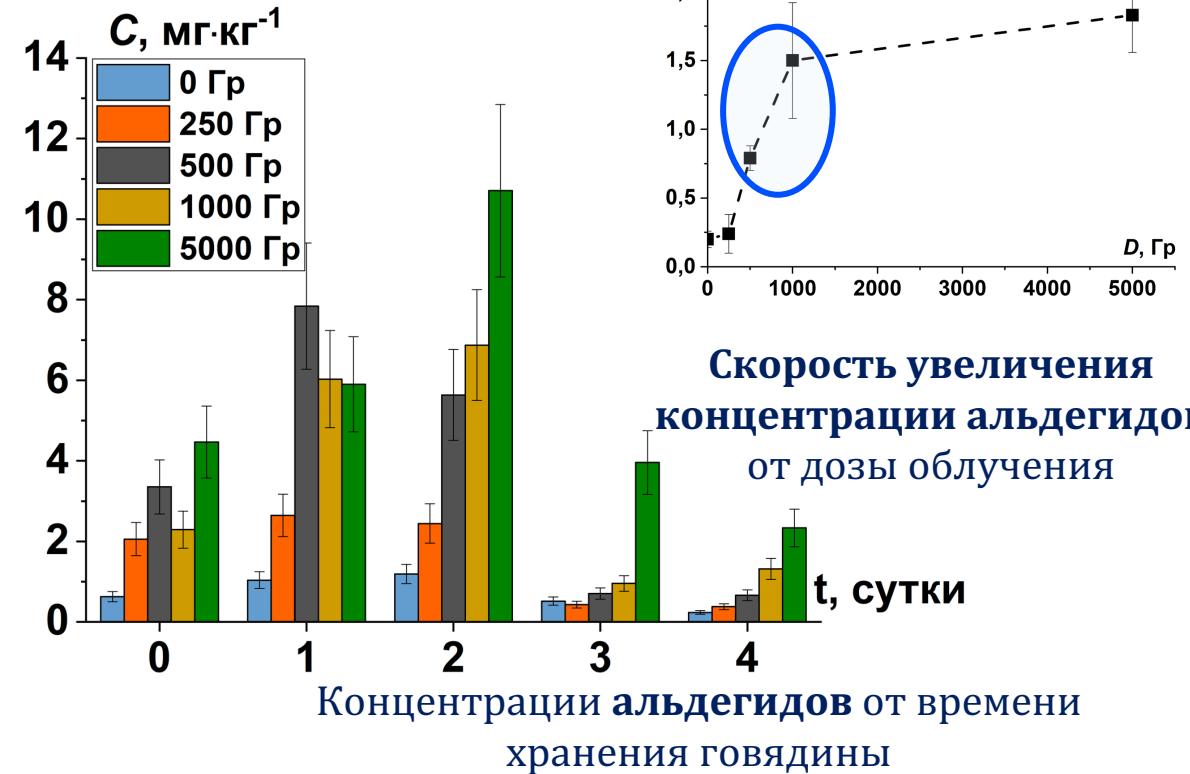
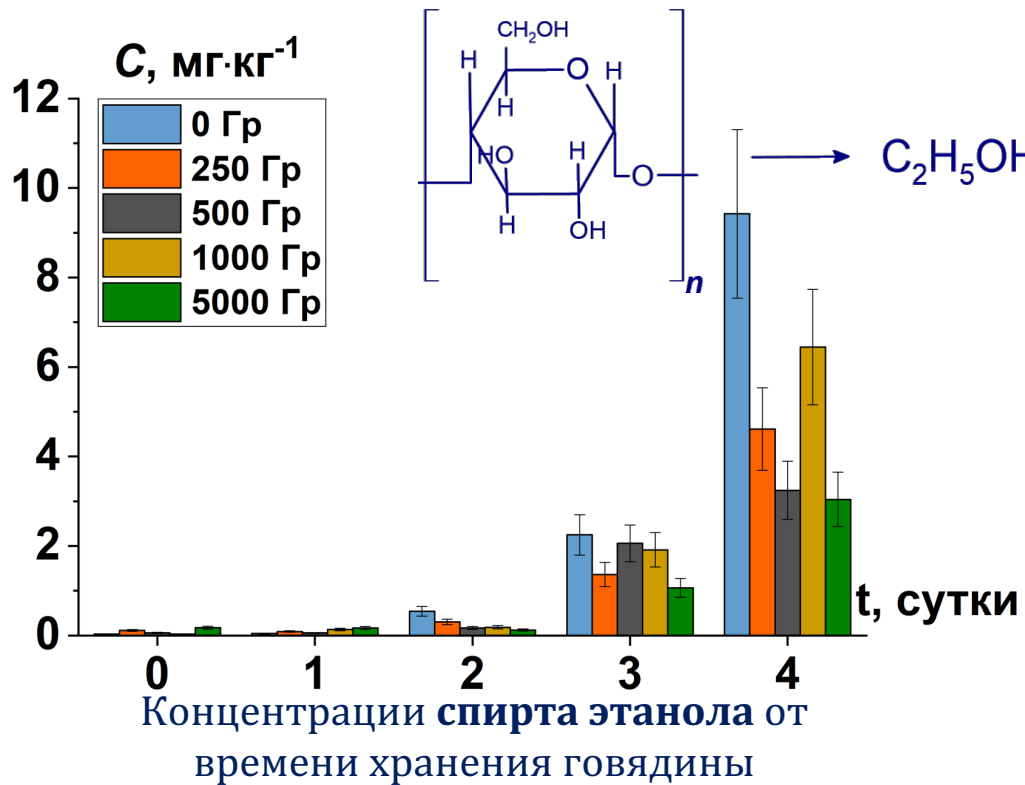
Результаты

Маркеры

- ✓ Концентрация ЛОС
- ✓ Концентрация метмиоглобина
- ✓ Концентрация пептидов

Идентификация
радиационной обработки

Концентрации летучих органических соединений как маркеры окислительных процессов, вызванных излучением



Подавление **бактериальной активности**

Цепные реакции **перекисного окисления липидов**

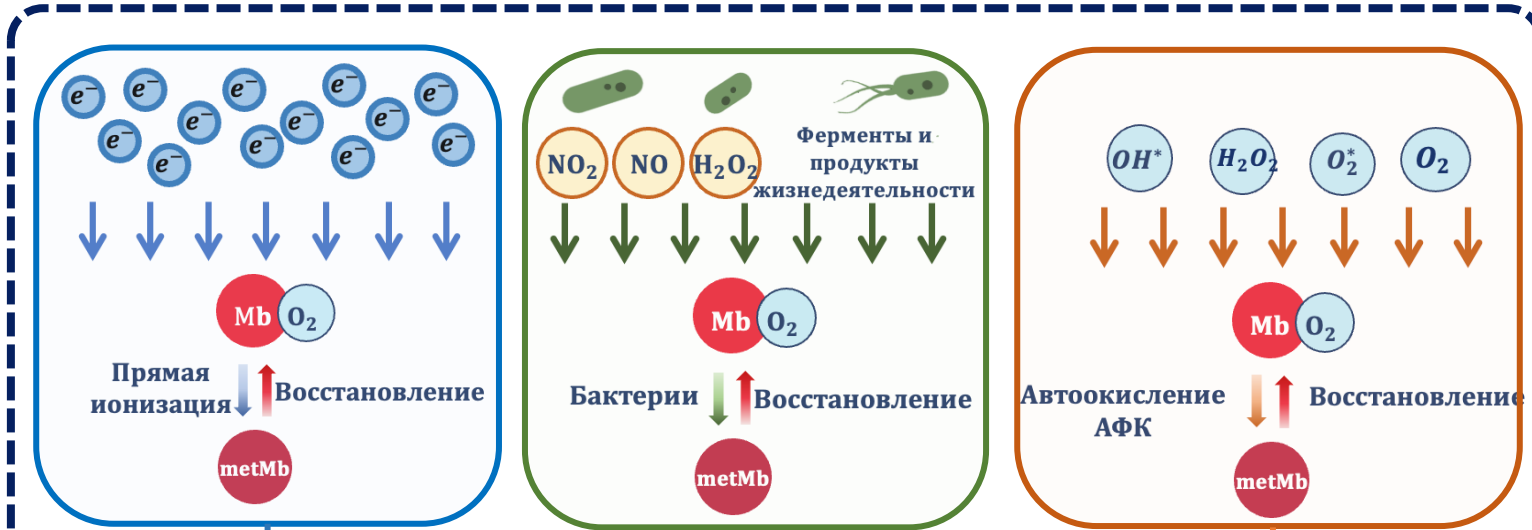
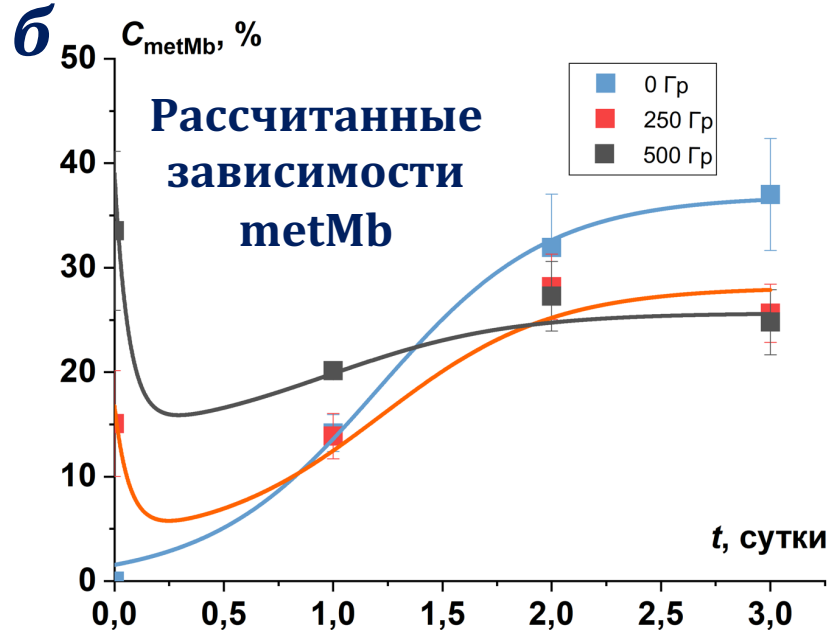
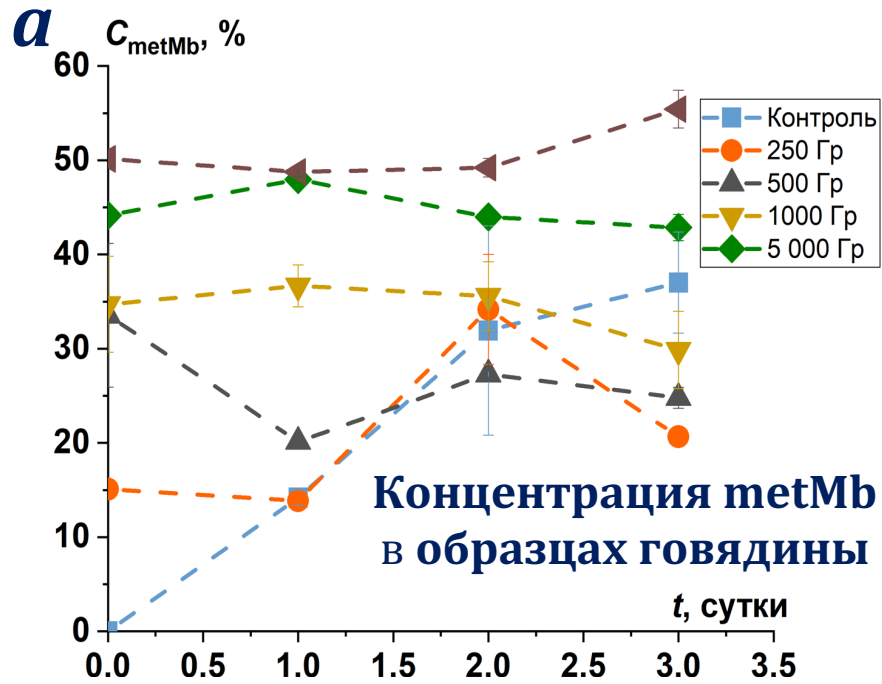
250 Гр

оптимальный диапазон

500-1000 Гр

D, Гр

Метмиоглобин – маркер окисления белковых молекул



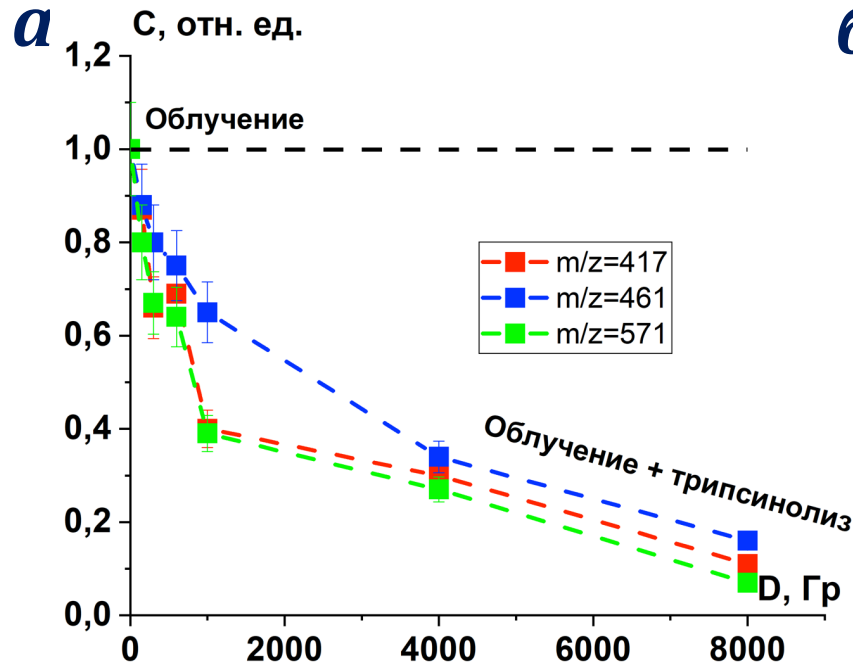
$$N_1(t_{\text{обл}}) = 1 - N_{\text{Fe}^{2+}} \cdot e^{-\varphi_n \sigma t_{\text{обл}}}$$

$$N_2(t) = \frac{kx_0(D)\epsilon(D)e^{\epsilon(D)t}}{\delta(D)x_0(D)e^{\epsilon(D)t} - \delta(D)x_0(D) + \epsilon(D)}$$

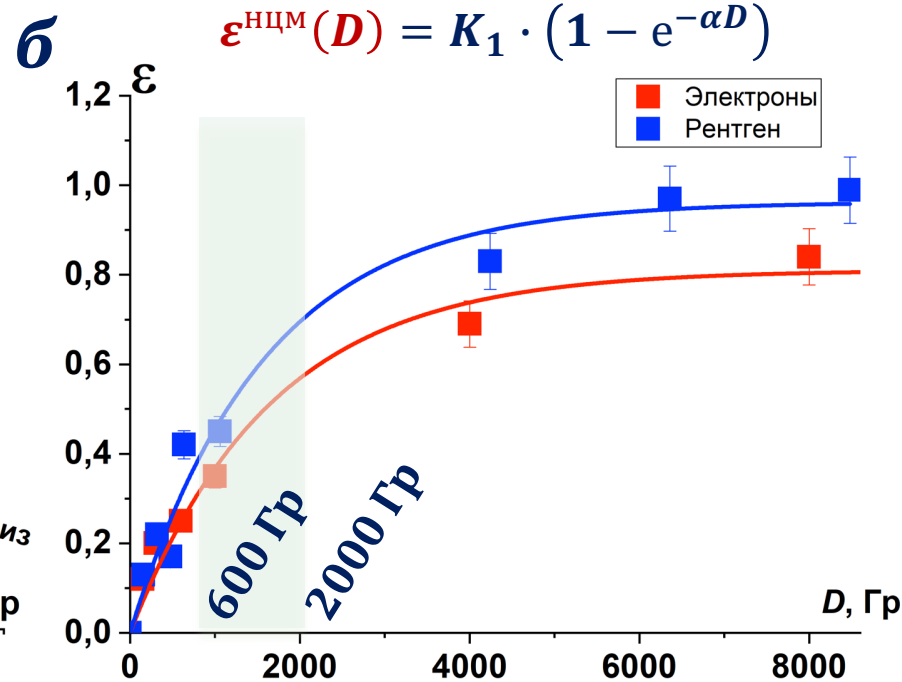
$$N = (N_1 + N_2 + N_3) \cdot e^{-bt}$$

Молекулы миоглобина как динамические статистические ансамбли, взаимно переходящие друг в друга при облучении и последующем хранении

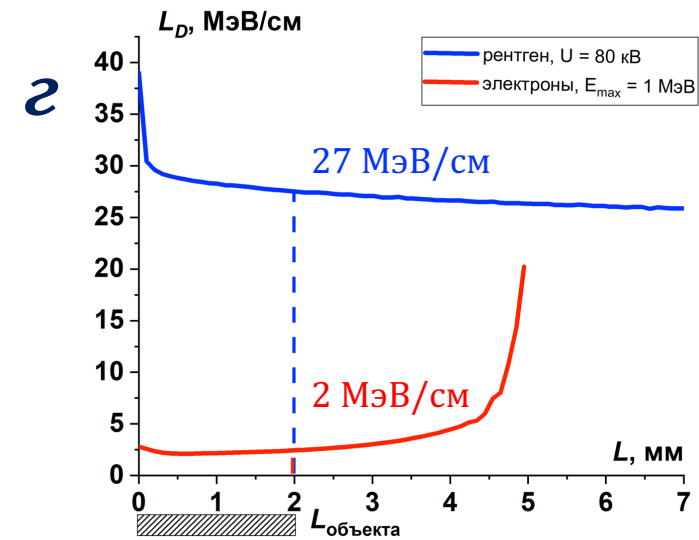
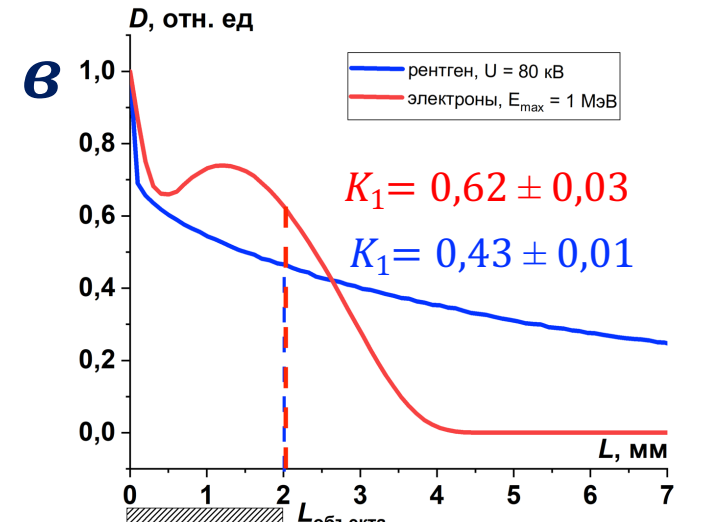
Селективные пептиды- маркеры скрытых повреждений нативной структуры белковых молекул



Концентрация пептидов белка БСА в зависимости от дозы при облучении ускоренными электронами



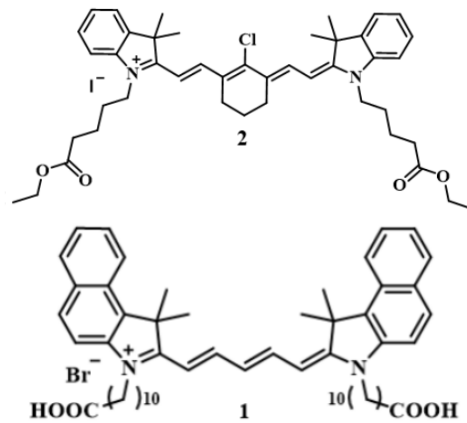
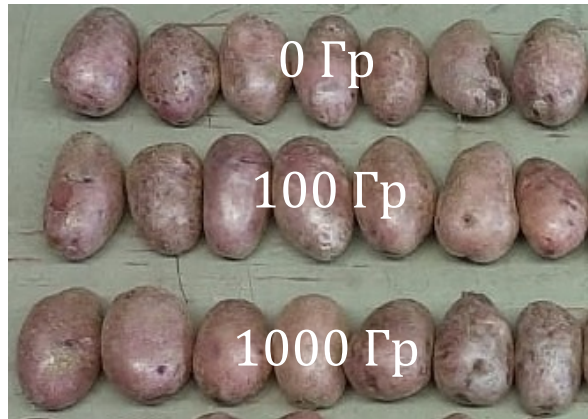
Эффективности повреждения нативной структуры белка $\epsilon^{НЦМ}(D)$ в модельной суспензии



Распределения поглощенной дозы (а) и ЛПЭ (б) при облучении **электронами** и **рентгеновским излучением**

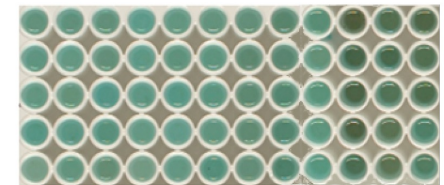
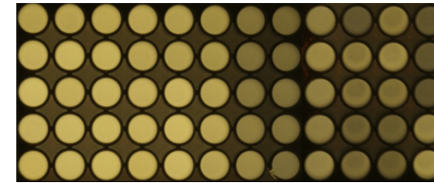
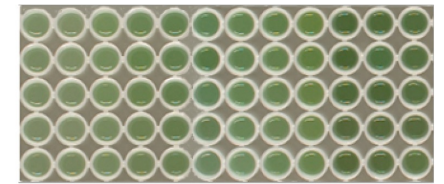
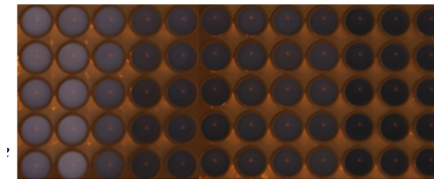
Тип излучения	α , Гр ⁻¹	K_1
Электроны	0,00060 ± 0,00006	0,90 ± 0,01
Рентгеновское излучение	0,00064 ± 0,00009	0,96 ± 0,04

Флуориметрический кинетический метод «отпечатков пальцев»

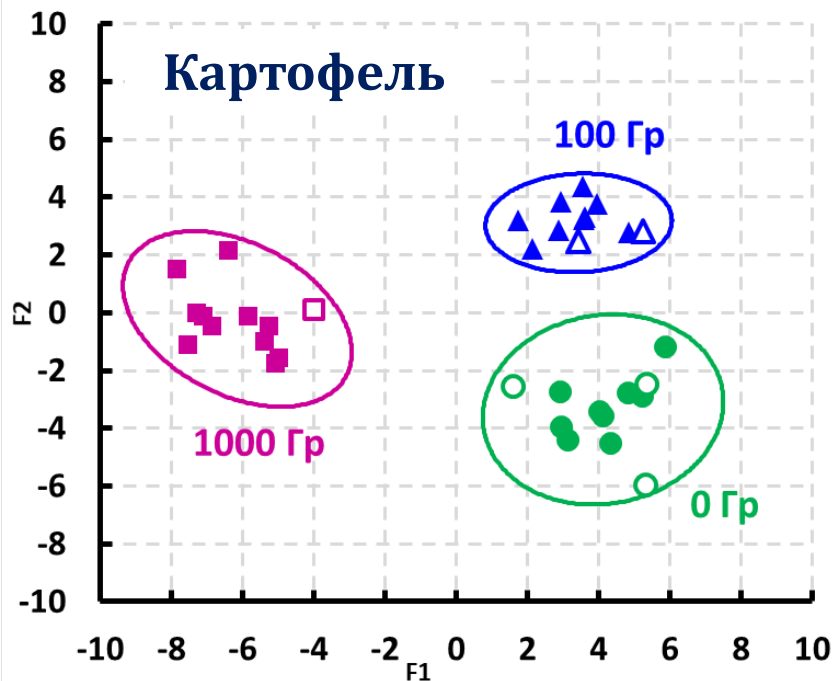


ИК

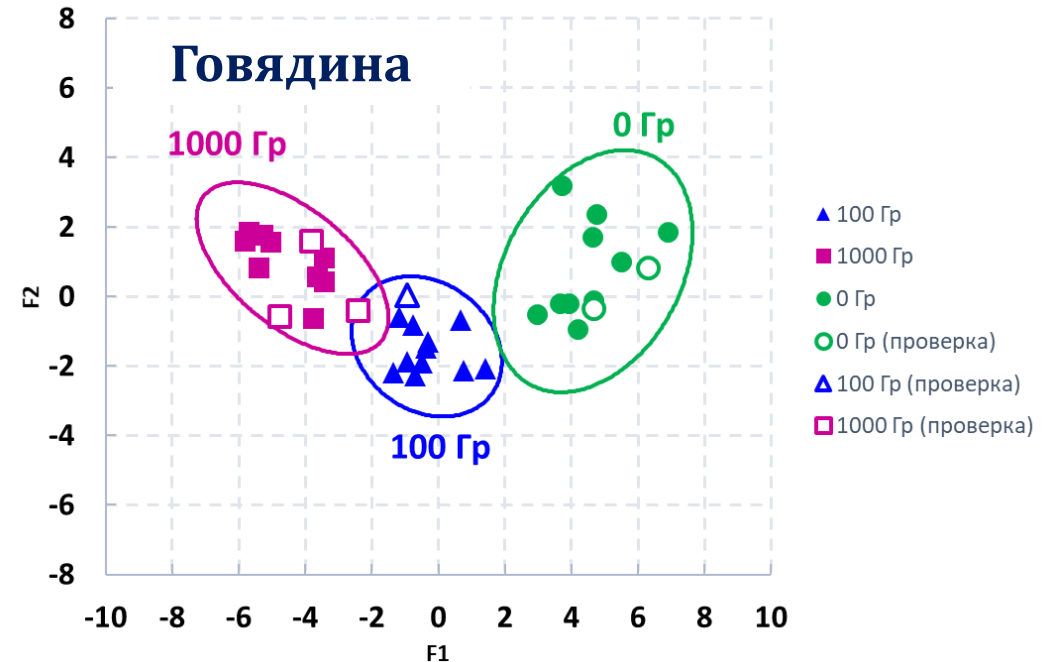
ВИД



контроль 100 Гр 1 кГр 10 кГр контроль 100 Гр 1 кГр 10 кГр



- ▲ 100 Гр
- 1000 Гр
- 0 Гр
- 0 Гр (проверка)
- ▲ 100 Гр (проверка)
- ◻ 1000 Гр (проверка)



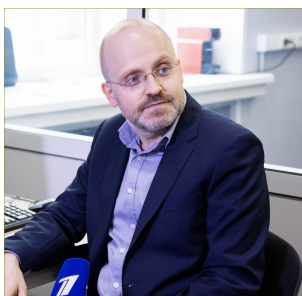
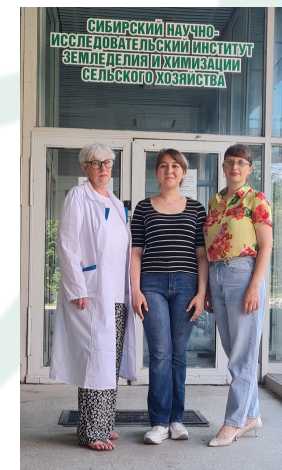
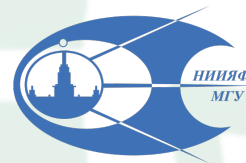
- ▲ 100 Гр
- 1000 Гр
- 0 Гр
- 0 Гр (проверка)
- ▲ 100 Гр (проверка)
- ◻ 1000 Гр (проверка)

- ✓ экстракция: 24 ч при 23-24 °С
- ✓ индикаторная реакция: IR-783 + NaOCl

- ✓ экстракция: 1 ч при 70 °С
- ✓ индикаторная реакция: краситель* + H₂O₂ + метамизол

Дальнейшие исследования

- ✓ Установление критериев выбора оптимального диапазона доз для различных категорий пищевой продукции;
- ✓ Установление маркеров облучения пищевых продуктов для формирования базы данных, регулирующей промышленное облучение;
- ✓ Работа над экспресс-методом идентификации облученных пищевых продуктов;
- ✓ Разработка универсальной системы планирования промышленной обработки сельскохозяйственной продукции и продуктов питания.



Грант РФФ №22-63-00075 «Поиск биохимических маркеров идентификации радиационной обработки объектов органического происхождения» (2022 – 2025 гг.)