

РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И КАЧЕСТВА ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ

У.А. Близнюк^{1,2}, И.М. Лебедеенко³, П.Ю. Борщеговская^{1,2}, В.С. Ипатова², В.С. Ким¹, Е.К. Козлова⁴, А.Д. Никитченко¹, А.В. Браун⁵, Т.А. Болотник⁵, М.К. Беклемишев⁵, С.А. Золотов², Я.В. Зубрицкая^{1,2}, А.А. Малюга⁶, А.Ю. Опруненко⁵, Н.А. Антипина⁸, М.С. Чибисова¹, И.А. Родин^{5,7}, Ф.Р. Студеникин^{1,2}, Н.С. Чуликова⁶, А.П. Черняев^{1,2}

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

² Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Москва

³ Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н.Н. Блохина Минздрава России, Москва

⁴ Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва

⁵ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

⁶ Сибирский федеральный научный центр агrobiотехнологий РАН, Новосибирская область, р.п. Краснообск

⁷ МИРЭА – Российский технологический университет, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, Москва

⁸ НМИЦ нейрохирургии им. академика Н.Н. Бурденко Минздрава России, Москва

RADIATION TECHNOLOGIES TO ENSURE SAFETY AND QUALITY OF FOOD PRODUCTS

U.A. Bliznyuk^{1,2}, I.M. Lebedenko³, P.Yu. Borshchegovskaya^{1,2}, V.S. Ipatova², V.S. Kim¹, E.K. Kozlova⁴, A.D. Nikitchenko¹, A.V. Braun⁵, T.A. Bolotnik⁵, M.K. Beklemishev⁵, S.A. Zolotov², Ya.V. Zubritskaya^{1,2}, A.A. Malyuga⁶, A.Yu. Oprunenko⁵, N.A. Antipina⁸, M.S. Chibisova¹, I.A. Rodin^{5,7}, F.R. Studenikin^{1,2}, N.S. Chulikova⁶, A.P. Chernyaev^{1,2}

¹ M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² D.V. Skobeltsyn Research Institute of Nuclear Physics at Moscow State University, Moscow, Russia

³ N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Moscow, Russia

⁴ I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, Russia

⁵ M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁶ Siberian Federal Scientific Center for Agrobiotechnology, Krasnoobsk, Novosibirsk Region, Russia

⁷ MIREA – Russian Technological University, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow, Russia

⁸ N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Moscow, Russia

Содержание

Введение

Физические принципы радиационной обработки

Безопасность пищевой продукции после радиационной обработки

Цели и дозы облучения

Промышленная радиационная обработка

Радиационная обработка как универсальный и эффективный способ борьбы с патогенами широкого спектра

Физико-химические изменения в продуктах питания после радиационной обработки

Планирование радиационной обработки продуктов питания

Заключение

Ключевые слова: радиационная обработка, пучки электронов, тормозное излучение, дозиметрическое планирование, продукты питания, патогены, планирование обработки

Contents

Introduction

Physical Principles of Food Irradiation

Food Safety after Irradiation

Irradiation Goals and Doses

Industrial Food Irradiation

Food Irradiation as a Versatile and Effective Method for Suppressing a Wide Range of Pathogens

Physical and Chemical Changes in Food Products after Irradiation

Planning of radiation processing of food products

Conclusion

Key words: food irradiation, electron beam, bremsstrahlung irradiation, dosimetry control, food products, pathogens, planning system for food irradiation

E-mail: uabliznyuk@gmail.com

<https://doi.org/10.52775/1810-200X-2026-110-2-123-138>

Введение

По данным Всемирной организации здравоохранения, ежегодно в мире регистрируется около 600 млн случаев заболеваний пищевого происхождения, из которых порядка 420 тыс. заканчиваются летальным исходом [1]. Значительная часть этих случаев связана с острыми кишечными инфекциями, вызываемыми широким спектром патогенов.

Согласно стратегии научно-технического развития Российской Федерации от 2024 г., обеспечение продовольственной безопасности и снижение технологических рисков в агропромышленном комплексе относятся к числу приоритетных направлений научно-технического развития нашей страны [2]. В связи с этим, совершенствование методов контроля безопасности и обработки пищевой и сельскохозяйственной продукции приобретает особую актуальность.

Традиционные методы обработки пищевой и сельскохозяйственной продукции, такие

как гомогенизация, пастеризация, консервирование, высушивание, копчение – обеспечивают инактивацию патогенных и условно-патогенных микроорганизмов и способствуют увеличению сроков годности продуктов [3]. Однако данные технологии зачастую сопровождаются изменением органолептических свойств, частичной потерей питательной ценности и/или использованием химических консервантов. В условиях повышенного внимания к сохранению пищевой ценности продуктов и снижению применения химических добавок активно внедряются физические методы обработки, а именно обработка высоким гидростатическим давлением (технология HPP) [4], импульсным электрическим полем [5], и радиационная обработка [6, 7].

Радиационная обработка зарекомендовала себя как эффективный способ обеспечения микробиологической безопасности продуктов питания путем подавления широкого спектра микроорганизмов, бактерий и вирусов под дей-

ствием ионизирующего излучения [8–11]. Помимо этого, радиационная обработка позволяет снижать степень контаминации семян сельскохозяйственных культур [12, 13], подавлять прорастание корнеплодов [14], замедлять процессы преждевременного созревания фруктов [7, 14], а также стимулировать рост и увеличивать урожайность культур [15]. Ключевыми преимуществами радиационной обработки являются отсутствие применения химических реагентов, высокая однородность воздействия и скорость обработки. Кроме того, радиационные технологии обладают потенциалом интеграции с другими физическими методами обработки – плазменной, лазерной и термической, что расширяет возможности комплексной обработки широкого спектра пищевой и сельскохозяйственной продукции.

Физические принципы радиационной обработки

Для радиационной обработки продуктов питания применяются пучки ускоренных электронов с энергией до 10 МэВ, тормозное излучение с номинальной энергией до 5 МэВ (в некоторых странах допускается до 7,5 МэВ [16]), получаемые на ускорителях электронов, и гамма-излучение, генерируемое радионуклидами ^{60}Co (период полураспада 5,2 года, энергия γ -квантов 1,17 МэВ и 1,33 МэВ) и ^{137}Cs (период полураспада 30 лет, энергия γ -квантов 0,66 МэВ) [17, 18]. Ограничение верхнего энергетического предела пучков электронов обусловлено требованиями радиационной безопасности, поскольку при указанных энергиях исключаются процессы образования наведенной радиоактивности в продукте [19, 20].

Пучки электронов и фотонов при взаимодействии с веществом продукта вызывают ионизацию и возбуждение молекул, приводя к физико-химическим изменениям в бактериальных клетках. В связи с тем, что большинство пищевых продуктов и биологических тканей характеризуются высоким содержанием воды, ключевую роль в механизме инактивации микроорганизмов играет радиоллиз воды. Образующиеся свободные радикалы и активные формы кислорода повреждают клетки микроорганизмов, приводя к геномным, биохимическим и морфологическим изменениям. Повреждения ДНК (одно- и двуцепочечные разрывы, модификации оснований, сшивки), нару-

шение структуры клеточных мембран и инактивация ферментов являются ключевыми факторами, которые приводят к потере репликативной способности и последующей гибели бактериальных клеток [21].

Безопасность пищевой продукции после радиационной обработки

Международная продовольственная организация ООН (ФАО), Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) и Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) подтвердили безопасность радиационной обработки в отношении пищевых продуктов. Было установлено отсутствие микробиологических и токсикологических рисков при соблюдении регламентированных доз излучения [22].

Международный нормативный документ CODEX STAN 106-19831 “Общий стандарт на пищевые продукты, обработанные проникающим излучением”, регламентирует допустимые к использованию источники ионизирующего излучения и требования к контролю обработанной продукции [23]. В документе определено, что при облучении любого продукта максимальная «общая средняя поглощенная доза» должна составлять не более 10 кГр, поскольку при данной дозе продукты остаются нетоксичными и полностью безопасными для потребления.

В Российской Федерации применение радиационной обработки пищевой продукции регулируется национальными нормативными документами [24–27], включая основополагающий межгосударственный стандарт ГОСТ ISO 14470-2014 “Радиационная обработка пищевых продуктов. Требования к разработке, валидации и повседневному контролю процесса облучения пищевых продуктов ионизирующим излучением”. Эти документы устанавливают требования к технологическим режимам, контролю дозы и методам идентификации факта облучения.

Цели и дозы облучения

В период с 1983 по 2004 гг. в результате сотрудничества экспертов и представителей 38 стран была создана Международная консультативная группа по облучению пищевых продуктов (ICGFI – International Consultative Group on Food Irradiation), действовавшая под эгидой

Таблица 1

Технологические рекомендуемые пределы поглощенных доз [29]

Классы пищевых продуктов	Цель облучения	Максимальная доза, кГр
Луковицы, корнеплоды, клубни	Замедление прорастания в процессе хранения	0,2
Свежие фрукты и овощи	1. Замедление созревания 2. Уничтожение насекомых 3. Увеличение срока хранения 4. Карантинный контроль импортируемой и экспортируемой сельскохозяйственной продукции	1. 1,0 2. 1,0 3. 2,5 4. 1,0
Зерно злаковых и мука, орехи, семена масличных культур, бобовые, сушеные фрукты	1. Уничтожение насекомых 2. Снижение количества микроорганизмов	1. 1,0 2. 5,0
Рыба, морепродукты (свежие или замороженные) и продукты их переработки	1. Снижение количества определенных патогенных микроорганизмов 2. Увеличение срока хранения 3. Контроль заражения паразитами в продукции, поставляемой на внутренний рынок	1. 5,0 2. 3,0 3. 2,0
Сырое мясо птицы, говядина, свинина (свежее или замороженное) и продукты их переработки	1. Сокращение количества патогенных микроорганизмов 2. Увеличение срока хранения 3. Контроль заражения паразитами в продукции, поставляемой на внутренний рынок	1. 7,0 2. 3,0 3. 2,0
Сухие овощи, специи, приправы, корма для животных, сухие травы и травяные чаи	1. Снижение количества патогенных организмов 2. Уничтожение насекомых	1. 10,0 2. 1,0
Сухие продукты животного происхождения	1. Дезинфекция 2. Сдерживание роста плесеней	1. 1,0 2. 3,0
Смешанная пища (космическая и больничная еда, армейские рационы, специи и др.)	1. Снижение количества микроорганизмов 2. Стерилизация 3. Карантинный контроль импортируемой и экспортируемой сельскохозяйственной продукции	1. >10 2. >10 3. >10

ФАО, МАГАТЭ и ВОЗ. Основной задачей ICGFI являлось оказание помощи правительствам в рассмотрении вопроса применения радиационной обработки пищевых продуктов, обеспечения ее контроля и сбыта.

В рамках деятельности ICGFI был подготовлен ряд технических документов, содержащих систематизированные данные по радиационной обработке различных категорий пищевой продукции. Эти материалы были опубликованы МАГАТЭ в виде серии документов IAEA-TECDOC [28]. В них представлены рекомендации о верхнем пороге применяемой дозы облучения с учетом достижения необходимой технологической цели, требования к типам радиационных установок и процедурам дозиметрического контроля для различных категорий обрабатываемой продукции (табл. 1) [29].

Промышленная радиационная обработка

На сегодняшний день наблюдается активное развитие инфраструктуры радиационной обработки, связанное с расширением сфер применения технологии в пищевой промышленности, медицине и материаловедении. Наибольшее количество центров промышленной радиационной обработки пищевой продукции сосредоточено в США и Китае – более 530 и 220 установок соответственно [30, 31]. При этом большая часть данных центров базируется на применении радиоактивных нуклидов ^{60}Co и ^{137}Cs .

В России функционируют 17 центров радиационной обработки, расположенных в различных регионах страны. Центры оснащены современными радиационно-техническими

установками, включая линейные непрерывные (УЭЛР, УЭЛВ и УРТ) и импульсные (ИЛУ) ускорители электронов, а также гамма-установки на

основе ^{60}Co . Основные промышленные радиационные центры и характеристики их установок приведены в табл. 2 [32–43].

Таблица 2

Центры радиационной обработки и типы источников излучения в России [32–43]

Название организации	Город	Тип излучателя	Источник	Основные параметры источника
АКЦЕНТР	Лыткарино	S-диапазон СВЧ	УЭЛ-10-10С	Ускоритель электронов – 10 МэВ
	Обнинск	S-диапазон СВЧ	УЭЛР-10-10Т УЭЛ-10-10С	Ускорители электронов – 10 МэВ; 10 МэВ
	Родники	S-диапазон СВЧ	УЭЛР-10-15С	Ускоритель электронов – 10 МэВ
	Колпино	S-диапазон СВЧ	Mevex	Ускоритель электронов – 5–10 МэВ
	Дубна	S-диапазон СВЧ	Mevex	Ускоритель электронов – 5–10 МэВ
	Казань	S-диапазон СВЧ	УЭЛР-10-20С	Ускоритель электронов – 10 МэВ
КНТП КОРАД	Калуга	S-диапазон СВЧ	УЭЛР-10-15-С-60-1	Ускоритель электронов – 5–10 МэВ
НИИЭФА РОСАТОМ	Санкт-Петербург	S-диапазон СВЧ	УЭЛР-5-1С	Ускоритель электронов – 5 МэВ
РАД	Санкт-Петербург	S-диапазон СВЧ	УЭЛР-10-10С2	Ускоритель электронов – 5–10 МэВ
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна, ФМБА России	Москва	S-диапазон СВЧ	ИЛУ-14	Ускоритель электронов – 7,5–10 МэВ
СФМ ФАРМ	Новосибирск	ВЧ линейный ускоритель, источник тормозного	ИЛУ-10	Ускоритель электронов – 5 МэВ
Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН	Новосибирск	ВЧ-линейный ускоритель с выпрямителем постоянного тока, источник тормозного излучения	ЭЛВ-6 ИЛУ-10	Ускорители электронов – 1,4 МэВ; 1,5 – 2,5, 4 – 5 МэВ
ИФХЭ РАН	Москва	Родотрон	УЭЛВ-10-10-С-70	Ускоритель электронов – 6–10 МэВ
Центр радиационной стерилизации Уральского федерального университета	Екатеринбург	S-диапазон СВЧ	УРТ-1 УРТ-05 УЭЛР-10-10С	Ускорители электронов – 1 МэВ; 0,5 МэВ; 8–10 МэВ
НИИЯФ МГУ	Москва	Линейный ускоритель S- и C-диапазона (тормозное излучение) СВЧ	УЭЛР-1-25-Т-001 УЭЛР-10-15-С-6	Ускорители электронов – 1 МэВ; 5–10 МэВ
Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии	Обнинск	Гамма источник	ГУР-120	Гамма-излучение радионуклида ^{60}Co
Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН. ФИЦ ПХФ и МХ РАН	Черноголовка	Гамма источник	Гамматок-100	Гамма-излучение радионуклида ^{60}Co

Центры радиационной обработки стерилизуют медицинские изделия, а именно аспираторы, бинты, катетеры, шприцы, бинты, перчатки, хирургические инструменты и др.; обрабатывают упаковку для пищевой, косметической и фармацевтической промышленности, осуществляют радиационную сшивку полимерных труб и кабелей, стерилизуют фармацевтические препараты и продукты питания (зерновые культуры, сельхозпродукция, корнеплоды) [32]; предоставляют услуги по антимикробной радиационной обработке мяса, овощей, фруктов, рыбы, специй, круп, сухофруктов и др. [33].

На сегодняшний день все большее количество промышленных центров оснащаются ускорителями электронов, позволяющими генерировать как электронные пучки, так и тормозное излучение. Это дает возможность обрабатывать широкий спектр продукции с различными физическими характеристиками, варьировать мощность дозы излучения, что позволяет увеличивать скорость обработки. Кроме того, использование ускорителей не требует утилизации радиоактивных отходов, что делает применение этой технологии безопасной для окружающей среды [44, 45].

МАГАТЭ рекомендует использовать низкоэнергетические пучки электронов и низкоэнергетическое тормозное излучение для поверхностной и приповерхностной антимикробной обработки пищевой продукции и сельскохозяйственных культур [44, 45]. В отличие от высокоэнергетических установок, которые часто требуют серьезной модернизации оборудования и создания радиационной защиты, низкоэнергетические системы могут быть значительно легче интегрированы в производственный процесс. В России наличие научно-исследовательской базы по созданию промышленных ускорителей электронов способствует активному развитию радиационных технологий для обработки различной продукции [6].

Радиационная обработка как универсальный и эффективный способ борьбы с патогенами широкого спектра

Известно, что продукты питания могут содержать различные микроорганизмы, в том числе патогенные и условно-патогенные бактерии, опасные для здоровья человека. В то вре-

мя как количество условно-патогенных бактерий ограничивается предельно допустимыми уровнями концентраций микроорганизмов, регламентированными нормативными документами [46], патогенные бактерии не должны присутствовать в продукте, поскольку вызывают серьезные заболевания и являются источниками токсичных соединений, представляющих опасность для человека. К патогенным микроорганизмам, часто встречающимся в пище, относятся такие бактерии, как *Salmonella*, бактерии рода *Listeria*, грибы родов *Aspergillus* и *Penicillium* [47, 48]. К опасным условно-патогенным микроорганизмам, которые могут встречаться в продуктах питания, относятся штаммы бактерий *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*. К наиболее опасным для здоровья человека бактериям, населяющим пищевую продукцию, относятся анаэробные бактерии вида *Clostridium botulinum*, вызывающие ботулизм, являющийся тяжелой формой пищевой интоксикации [49].

При планировании обработки пищевой продукции необходимо учитывать, что микроорганизмы, населяющие один и тот же продукт, могут обладать различными биофизическими свойствами и оптимальными условиями для выживаемости популяции [50–56]. Поскольку для микроорганизмов каждого типа существует оптимальный уровень pH и оптимальная температура, при которой скорость роста популяции максимальна (табл. 3), дозы, инактивирующие те или иные микроорганизмы в различных продуктах питания, могут варьироваться.

Анализ литературы показал, что одни и те же микроорганизмы демонстрируют различную радиочувствительность в зависимости от типа продукта [57], при этом для всех микроорганизмов наблюдается экспоненциальное снижение их концентрации от дозы облучения (рис. 1а) [11, 57–61]. Для численной оценки влияния ионизирующего излучения на бактериальные клетки используется значение дозы D_{10} – дозы, необходимой для сокращения популяции жизнеспособных клеток в 10 раз. Доза D_{10} рассчитывается по формуле:

$$D_{10} = D / (\log_{10} N - \log_{10} N_0), \quad (1)$$

где D – доза облучения, N_0 и N – начальная концентрация микроорганизмов и концентрация микроорганизмов после облучения в дозе D соответственно. Построив линейную зависи-

Таблица 3

Температурные диапазоны и диапазоны уровня pH, обеспечивающие рост популяции бактерий, наиболее часто встречающихся в пищевой продукции [50–56]

Вид микроорганизма	Где встречаются	Температура роста / оптимальная T	Кислотность / оптимальная pH
<i>Staphylococcus aureus</i>	Продукты Кровь Имплантаты	7°C – 48,5°C / 30°C – 37°C	4,0–10,0 / 6,0–7,0
<i>Escherichia coli</i>	Продукты Кровь Имплантаты	4°C – 45°C / 37°C	3,6–9,0 / 7,0
<i>Streptococcus</i>	Кровь	4°C – 46°C / 40°C	/ 6,5
<i>Lactobacillus</i>	Продукты	2°C – 41°C / 44°C	3,4–6,8 / 5,8
<i>Salmonella</i>	Продукты	6°C – 46°C / 37°C	4,1–9,0 / 6,5–7,5
<i>Bacillus</i>	Кровь	4°C – 48°C / 30 – 40°C	4,5–9,5 / 6,0–7,0
<i>Listeria monocytogenes</i>	Продукты	1°C – 45°C / 30°C – 37°C	4,5–9,6 /

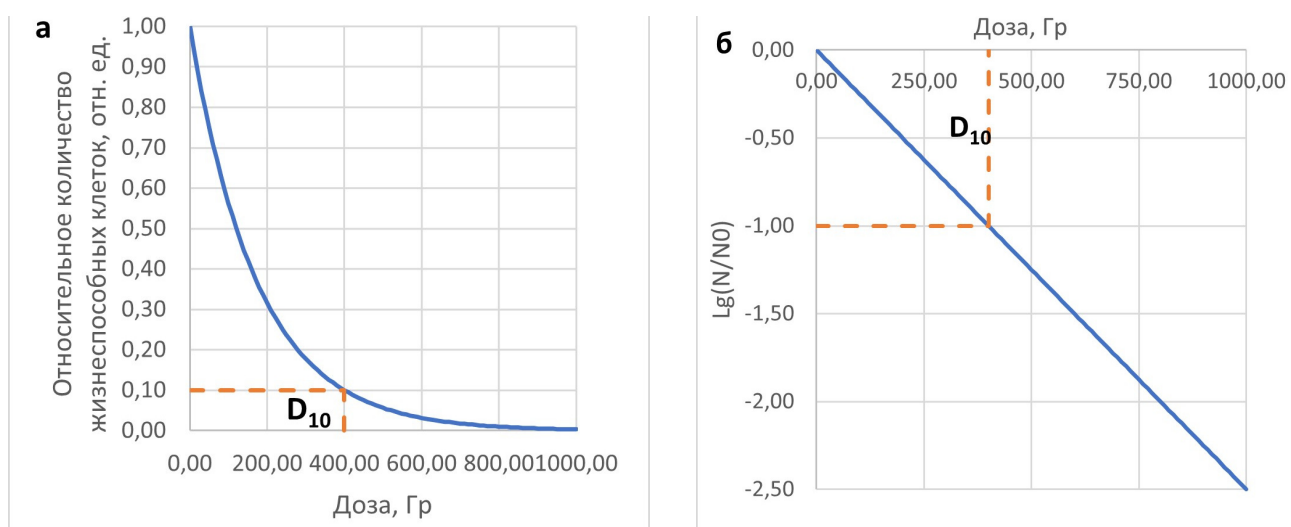


Рис. 1. а – зависимость относительной концентрации микроорганизмов, нормированная на начальную концентрацию от дозы излучения; б – зависимость $\text{Log}_{10}N/N_0$ от дозы излучения

мость величины $\log_{10}(N/N_0)$ от дозы облучения D , можно определить величину D_{10} (рис. 1б).

В табл. 4 [62, 63] представлены значения доз D_{10} для различных микроорганизмов в разных питательных средах и температуре хранения. Из табл. 4 видно, что чем выше температура продукта при хранении, тем большие дозы необходимы для инактивации микроорганизмов, что также необходимо учитывать при планировании обработки. При этом наибольшие дозы необходимы для инактивации анаэробных микроорганизмов.

При выборе оптимального источника излучения для радиационной обработки необходимо учитывать, что эффективность подавления микроорганизмов может зависеть от типа излучения. Результаты исследований эффек-

тивности подавления микроорганизмов различными источниками ионизирующего излучения представлены в табл. 5 [11, 60, 64].

Из табл. 5 видно, что значения D_{10} для микроорганизмов в различных продуктах при обработке излучениями различных типов в среднем отличаются в диапазоне от 1,05 до 1,77 раз. Такое различие в эффекте подавления микроорганизмов обусловлено различным распределением физических характеристик излучения в продукте, таких, как плотность потока частиц (флюенс), доза, линейная передача энергии (ЛПЭ), линейная плотность ионизации (ЛПИ), и свойствами целевых микроорганизмов, а именно размерами микроорганизмов, количеством актов ионизации, необходимых для их инактивации. Некоторые работы указывают на зависимость эффективности инакти-

Таблица 4

**Значения доз D_{10} для микроорганизмов на различных питательных средах
при разных температурных условиях [62, 63]**

Микроорганизмы	Питательная среда	$T, ^\circ\text{C}$	$D_{10}, \text{кГр}$
<i>E. coli</i>	Говядина	0	0,241–0,251
		–16	0,178–0,235
		–30	0,315
	Твердая питательная среда (NB agar)	0–2	0,27
	Индейка	–30	0,293
		0–2	0,47
<i>Salmonella</i>	Говядина	18–20	0,55–0,78
		4	0,618–0,661
		–16	0,675–0,800
	Курица	4	0,436–0,662
		–20	0,45–0,79
<i>Staphylococcus</i>	Курица	4	0,371–0,419
		0	0,26–0,36
	Говядина	–	0,387
		4	0,437–0,453
<i>Clostridium Botulinum</i> (штаммы А, В и Е)	фосфатный буфер рН = 7,4	–	≤1,3
<i>Clostridium Botulinum</i> (штаммы 12885А, 62А, 77А, 9В)			2,3
<i>Clostridium Botulinum</i> (штаммы 33А, 36А, 40В, 41В, 53В)			3,3

Таблица 5

**Значения доз D_{10} для микроорганизмов на различных питательных средах, облученных
разными источниками ионизирующего излучения [11, 60, 64]**

Бактерии	Питательная среда	Источник излучения	$D_{10}, \text{кГр}$
<i>Salmonella</i>	Свинина	Гамма-излучение (^{137}Cs)	0,56–0,62
		Ускоренные электроны	0,42–0,43
	Рис	Гамма-излучение	0,234–0,266
		Тормозное излучение	0,377
<i>E. coli</i>	Копченая индейка	Гамма-излучение (^{60}Co)	0,41
		Ускоренные электроны	0,39
	Рис	Гамма-излучение	0,228–0,367
		Тормозное излучение	0,403
<i>Staphylococcus aureus</i>	Копченая индейка	Гамма-излучение (^{60}Co)	0,52
		Ускоренные электроны	0,49
<i>Enterococcus faecalis</i>	Копченая индейка	Гамма-излучение (^{60}Co)	0,63
		Ускоренные электроны	0,57
<i>Listeria monocytogenes</i>	Копченая индейка	Гамма-излучение (^{60}Co)	0,58
		Ускоренные электроны	0,54
	Рис	Гамма-излучение	0,232–0,236
		Тормозное излучение	0,302

вазии микроорганизмов от мощности дозы излучения. Так, например, в исследовании по облучению риса с целью подавления популяции *E.coli* гамма-излучением ^{60}Co при увеличении мощности дозы от 0,06 Гр/с до 2,53 Гр/с значения дозы D_{10} уменьшались от 0,367 кГр до 0,326 кГр [11].

Вероятностный характер взаимодействия излучения и микроорганизмов вследствие гетерогенности излучения и биологических структур, различная радиоустойчивость микроорганизмов в различных биологических фазах, неоднородность радиобиологической чувствительности микроорганизмов в одной

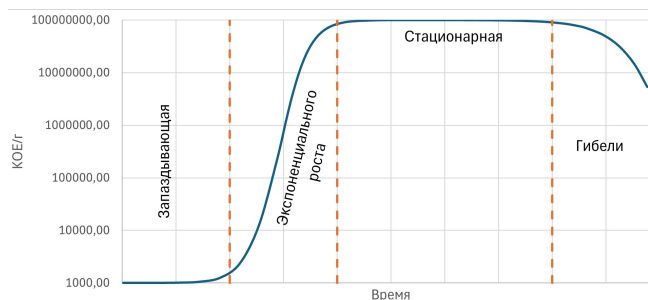


Рис. 2. Характерная кинетическая кривая роста популяции бактерий в продукте от времени хранения

популяции приводит к не 100 %-й инактивации микроорганизмов в облучаемом продукте [65, 66]. При дальнейшем хранении продукта после радиационной обработки при условиях, обеспечивающих рост популяции, наблюдается сигмоидальная зависимость количества жизнеспособных клеток от времени хранения (рис. 2).

Анализ литературы показывает, что параметры сигмиды определяются типом микроорганизмов и дозой облучения [67–69]. Чем выше доза облучения, тем дольше наблюдается запаздывающая фаза, при которой не происходит роста численности популяции, и тем ниже скорость роста популяции в области экспоненциального роста и меньше максимальное до-

стижимое число микроорганизмов в продукте (рис. 3а) [67].

Если условия окружающей среды не являются оптимальными для размножения микроорганизмов, то происходит либо сохранение числа жизнеспособных клеток с их последующим ростом [70, 71], либо дальнейшее экспоненциальное снижение оставшихся после облучения жизнеспособных клеток [72], причем скорость снижения концентрации бактерий тем выше, чем больше доза облучения (рис. 3б) [67, 72]. Таким образом, при планировании радиационной обработки с целью продления сроков хранения продукта необходимо учитывать не только физические характеристики излучения и типы микроорганизмов, населяющих продукт, но и последующие условия хранения продукции.

Физико-химические изменения в продуктах питания после радиационной обработки

Поскольку любой продукт содержит белки, жиры и углеводы, витамины и другие макро- и микронутриенты, которые, наряду с инактивацией целевых микроорганизмов, могут повреждаться при воздействии излучения, для повышения эффективности радиационной обработки с целью обеспечения безопасности и

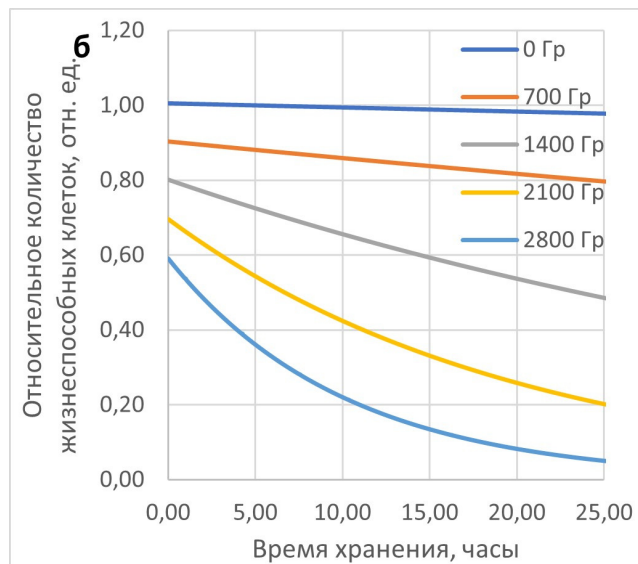
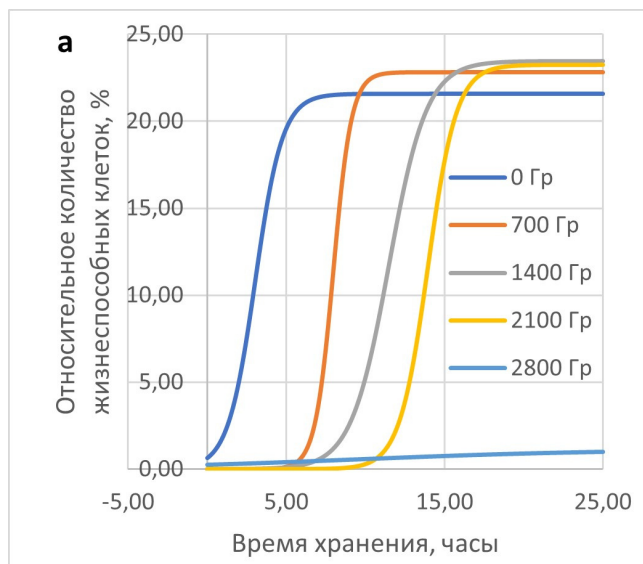


Рис. 3. а – Зависимость относительной концентрации бактерий *E. coli* в стандартном питательном бульоне, облученных ускоренными электронами в диапазоне доз от 700 Гр до 2800 Гр, от времени хранения при температуре 37°C [67]; б – Зависимость относительной концентрации бактерий *Salmonella* в говяжьих сосисках, облученных ускоренными электронами в диапазоне доз от 1000 Гр до 5000 Гр, от времени хранения при температуре 4°C [67, 72].

сохранения качества продукции необходимо учитывать возможные физико-химические изменения в продуктах. Так, вследствие радиационно-индуцируемых реакций с образованием свободных радикалов и их последующих реакций с органическими молекулами, а также в результате первичной ионизации атомов и молекул вещества продукта могут повреждаться клеточные структуры биологических тканей [73].

Одними из наиболее подверженных разрушению молекул являются липиды. Их окисление приводит к образованию широкого спектра высокомолекулярных и низкомолекулярных соединений, в том числе, летучих органических соединений, ответственных за запах продукта. Повышенные концентрации определенных летучих соединений могут вызывать неприятные изменения в запахе продукта, а также негативно сказываться на пищевой ценности продуктов, вызванного окислением жирных кислот [74]. Исследования показывают, что окисление липидов в пищевых продуктах начинается при обработке в дозах от 1 до 3 кГр, а при увеличении дозы до 5–7 кГр вследствие цепных реакций перекисного окисления липидов происходят значительные изменения органолептических показателей продукции [75–78].

Анализ литературы показал, что радиационная обработка в дозах 2,5–3 кГр может снижать энтальпию денатурации белковых молекул [79], при этом дозы облучения свыше 9 кГр приводят к снижению общего содержания аминокислот и, соответственно, к ухудшению усвояемости белка [80]. Воздействие излучения на углеводы также может приводить к окислению и разрушению гликозидных связей, что, в свою очередь, вызывает расщепление как сахаров, так и сложных углеводов [81].

Радиационная обработка может влиять на содержание витаминов в продуктах, причем некоторые витамины более чувствительны к воздействию излучения, чем другие [82, 83]. Так, например, потеря витамина С наблюдается при дозах облучения свыше 3–4 кГр, в то время как содержание витаминов А и Е остается практически неизменным при обработке в дозах до 5 кГр [84, 85]. Следует отметить, что витамины С и Е могут выступать в роли антиоксидантов, защищая другие компоненты пищи от химических изменений, вызванных облучением и свободными радикалами [86].

Наряду с биохимическими изменениями, связанными с окислением биомакромолекул,

авторы отмечают изменения цвета и текстуры продуктов, а также их водоудерживающей способности [77]. Отмечено, что дозы 3–7 кГр вызывают разрушение соединительной ткани мяса [87]. При обработке говядины в дозах свыше 2 кГр наблюдается изменение цвета продукта за счет окисления оксимиоглобина до метмиоглобина [88]. Вследствие изменения структуры белков уменьшается водоудерживающая способность мясных продуктов [89]. Таким образом, радиационная обработка может приводить как к биохимическим, так и физическим изменениям в продуктах питания, влияющим на качество продукта, что необходимо учитывать при планировании радиационной обработки.

Планирование радиационной обработки продуктов питания

Для решения задачи планирования радиационной обработки пищевой продукции сотрудники кафедры физики ускорителей и радиационной медицины физического факультета совместно с сотрудниками кафедры аналитической химии химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова МГУ и сотрудниками Сибирского федерального научного центра агробιοтехнологий РАН предложили междисциплинарный подход к оптимизации радиационной обработки пищевой продукции, состоящий из двух этапов. Первый этап включает в себя расчет оптимальных параметров облучения для обеспечения максимальной однородности дозы для каждого вида пищевого продукта, обладающего специфическими физическими параметрами [90]. Второй этап включает в себя определение оптимального диапазона доз, который позволяет максимально подавить размножение микроорганизмов при минимальном повреждении окружающих липидов, белков и углеводов, с учетом равномерности дозы, рассчитанной на предыдущем этапе. Расчет оптимальных параметров облучения для пищевых продуктов производится с помощью программного обеспечения, которое имитирует реальные пищевые продукты в виде водных фантомов с линейными размерами и плотностью, соответствующими реальным продуктам, с учетом физико-технических параметров облучающих установок [91]. На втором этапе определяется оптимальная доза облучения, которая обеспечивает максимальное подавление мик-

роорганизмов при минимальном негативном воздействии на белки, липиды, углеводы, ферменты, содержащиеся в пищевом продукте, которые отвечают за органолептические свойства продукта. В исследовании предлагается математически обоснованная функция оптимизации:

$$H(D) = \varepsilon^{\text{II}} \cdot (1 - \varepsilon^{\text{III}}), \quad (2)$$

где ε^{II} – эффективность подавления микроорганизмов, а ε^{III} – степень повреждения окружающих молекул.

Функция $H(D)$ имеет максимальное значение $H_{\text{макс}}$, которое соответствует оптимальной дозе $D_{\text{опт}}$, при которой подавление микроорганизмов максимально, при этом минимизируется повреждение окружающих молекул. Оптимальный диапазон доз ($D_{\text{мин}}$, $D_{\text{макс}}$) включает дозу $D_{\text{опт}}$, при этом отношение $D_{\text{мин}}/D_{\text{макс}}$ не ниже максимально возможной однородности дозы, рассчитанной на первом этапе. Данный подход позволяет спланировать радиационную обработку продукта с учетом его индивидуального микробиологического и химического состава [90].

Заключение

Радиационная обработка пищевой продукции в настоящее время является научно обоснованной и признанной на международном уровне технологией обеспечения безопасности и продления сроков хранения продуктов питания. Такие организации, как ВОЗ, ФАО ООН и МАГАТЭ подтверждают безопасность облучения при использовании разрешенных источников излучения и соблюдении регламентированных доз излучения. В мире технология активно применяется более чем в 60 странах для обработки специй, зерновых, фруктов, овощей, мяса и морепродуктов, при этом объемы промышленного использования ежегодно растут.

В Российской Федерации радиационная обработка пищевой продукции нормативно разрешена и регулируется действующими санитарными правилами и техническими регламентами. Несмотря на то, что масштабы практического внедрения в России пока уступают ряду зарубежных стран, в последние годы наблюдается расширение научных исследований и интереса со стороны предприятий агропромышленного комплекса к данной технологии как к инструменту повышения микробиологи-

ческой безопасности и экспортного потенциала продукции.

Вследствие увеличения спроса на применение технологии со стороны производителей пищевой продукции и расширения спектра обрабатываемых продуктов для повышения эффективности радиационной обработки необходимым является научно-обоснованное планирование обработки, учитывающее индивидуальный микробиологический и биохимический состав продукта. Разработка оптимальных диапазонов доз для конкретных видов сырья и целевых задач позволяет обеспечить достижение требуемого санитарно-гигиенического эффекта при сохранении пищевой ценности и органолептических свойств продукции. Недостаточные дозы могут быть неэффективными, тогда как избыточные – приводить к нежелательным физико-химическим изменениям, влияющим на показатели качества продукции.

Дальнейшее развитие радиационной обработки пищевой продукции связано не только с расширением нормативной и производственной базы, но и с совершенствованием методических подходов к обоснованию оптимальных режимов обработки, а также с интеграцией технологии в комплексные системы управления качеством и безопасностью пищевой продукции.

Список литературы

1. Food safety. WHO. 2024. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/food-safety>.
2. Указ Президента Российской Федерации от 28.02.2024 № 146 “О стратегических целях и задачах развития Российского научного фонда на период до 2030 года”. <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202402280004>.
3. Fellows RJ. 13 - Evaporation and distillation. Food Processing Technology (Fourth Edition). Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. 2017; 623-58. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081005224000134>.
4. Balasubramaniam VMB, Martnez-Montea-gudo SI, Gupta R. Principles and application of high pressure-based technologies in the food industry. Ann Rev Food Sci Technol. 2015; 6: 435-62. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-FOOD-022814-015539>.

5. Mohamed MEA, Amer Eiss AH. Pulsed Electric Fields for Food Processing Technology. Structure and Function of Food Engineering. InTech. 2012. <https://doi.org/10.5772/48678>.
6. Черняев АП, Розанов ВВ, Козлова ЕК, Матвейчук ИВ, Близняк УА, Ипатова ВС. Радиационные технологии обработки биообъектов. Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. 2025; 80 (3): 2530201. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.80.2530201>.
Chernyaev AP, Rozanov VV, Kozlova EK, Matveychuk IV, Bliznyuk UA, Ipatova VS. Radiation Technologies for the Treatment of Biological Objects. Moscow University Physics Bulletin. 2025; 80 (3): 389-415. <https://doi.org/10.3103/S0027134925700572> (In Russ).
7. Indiarto R, Pratama AW, Sari TI, Theodora HC. Food irradiation technology: A review of the uses and their capabilities. Int J Eng Trends Technol. 2020; 68: 91-8.
8. Danyo EK, Ivantsova MN, Selezneva IS. Ionizing radiation effects on microorganisms and its applications in the food industry. Foods and Raw Materials. 2024; 12 (1): 1-12. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2024-1-583>.
9. Maherani B, Hossain F, Criado P, Ben-Fadhel Y, Salmieri S, Lacroix M. World Market Development and Consumer Acceptance of Irradiation Technology. Foods. 2016; 5 (4): 1-21. <https://doi.org/10.3390/FOODS5040079>.
10. Lung HM, Cheng YC, Chang YH, Huang HW, Yang BB, Wang CY. Microbial decontamination of food by electron beam irradiation. Trends Food Sci Technol. 2015; 44 (1): 66-78. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2015.03.005>.
11. Begum T, Follett PA, Hossain F, Christopher L, Salmieri S, Lacroix M. Microbicidal effectiveness of irradiation from Gamma and X-ray sources at different dose rates against the foodborne illness pathogens Escherichia coli, Salmonella Typhimurium and Listeria monocytogenes in rice. LWT. 2020; 132: 109841. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109841>.
12. Павлов АН, Снегирев АС, Чиж ТВ, Лой НН. Практические аспекты применения современных радиационных технологий в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Товаровед продовольственных товаров. 2020; (3).
13. Дорошкевич СЮ, Артемов КП, Терещенко НН, Зюбанова ТИ, Воробьев МС, Акимова ЕЕ и др. Предпосевная обработка семян яровой пшеницы импульсным электронным пучком в атмосфере. Химия высоких энергий. 2021; 55 (4): 326-32. <https://doi.org/10.31857/S0023119321040069>.
Doroshkevich SY, Artemov KP, Tereshchenko NN, Zyubanova TI, Vorobyov MS, Akimova EE, et al. Presowing Treatment of Spring Wheat Seeds by a Pulsed Electron Beam in the Atmosphere. High Energy Chemistry. 2021; 55: 329-35. <https://doi.org/10.1134/S0018143921040068/TABLES/6> (In Russ).
14. Bisht B, Bhatnagar P, Gururani P, Kumar V, Tomar MS, Sinhar R, et al. Food irradiation: Effect of ionizing and non-ionizing radiations on preservation of fruits and vegetables – a review. Trends Food Sci Technol. 2021; 114: 372-85. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2021.06.002>.
15. Аллаярова АС, Шитикова АВ, Файнгольд ИИ, Аллаярова УЮ, Климанова ЕН, Сашенкова ТЕ, и др. Влияние дозы гамма-облучения на урожайность и острую токсичность семенных клубней картофеля сорта “Метеор”. Химия высоких энергий. 2023; 57 (4): 304-13. <https://doi.org/10.31857/S0023119323040022>.
Allayarova AS, Shitikova AV, Faingold II, Allayarova UYu, Klimanova EN, Sashenkova TE, et al. Effect of Gamma-Irradiation Dose on the Yield and Acute Toxicity of Seed Potato Tubers of the Meteor Variety. High Energy Chemistry. 2023; 57: 341-50. <https://doi.org/10.1134/S0018143923040021> (In Russ).
16. FDA US. United States Food and Drug Administration. Irradiation in the production, processing and handling of food. Fed Regist. 1986; 51: 13375-99.
17. ISO 11137-3:2017 - Sterilization of health care products – Radiation – Part 3: Guidance on dosimetric aspects of development, validation and routine control. <https://www.iso.org/ru/standard/63841.html>.
18. ГОСТ ISO 14470-2014. Радиационная обработка пищевых продуктов. Требования к разработке, валидации и повседневному контролю процесса облучения пищевых продуктов ионизирующим излучением. – Введ. 2016-01-01.
19. Farkas J. Food Irradiation. Chapter 26. Charged Particle and Photon Interactions with Matter. Chemical, Physicochemical, and Biological Consequences with Applications, edited by A. Mozumder, Y. Hatano. 2004. <https://doi.org/10.1201/9780203913284>.

20. McKeown J, Armstrong L, Cleland MR, Drewell NH, Dubeau J, Lawrence CB, et al. Photon energy limits for food irradiation: a feasibility study. *Radiation Physics and Chemistry*. 1998; 53 (1): 55-61. [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(97\)00312-5](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(97)00312-5).
21. Кудряшов ЮБ. Радиационная биофизика (ионизирующие излучения):. Под ред. В.К. Мазурика, М.Ф. Ломанова; МГУ им. М.В. Ломоносова. Москва: Физматлит, 2004. 442 с.: ил., табл.: 22 см.; ISBN 5-9221-0388-1.
22. World Health Organization. Wholesomeness of irradiated food: report of a Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee. Geneva, Technical Report Series No.659. 1981.
23. International Atomic Energy Agency. Revision of the Recommended International General Standard for Irradiated Food and of the Recommended International Code of Practice for the Operation of Radiation Facilities Used for the Treatment of Foods. Report of a Consultation Group, FAO/IAEA/WHO. Geneva. IAEA-TEC-DOC-258. 1981.
24. ГОСТ ISO 14470-2014. Радиационная обработка пищевых продуктов. Требования к разработке, валидации и повседневному контролю процесса облучения пищевых продуктов ионизирующим излучением. – Введ. 2016-01-01.
25. ГОСТ 33339-2015. Радиационная обработка пищевых продуктов. Основные технические требования. – Введ. 2017-01-01.
26. ГОСТ 33340-2015. Пищевые продукты, обработанные ионизирующим излучением. – Введ. 2017-01-01.
27. ГОСТ 33820-2016. Мясо свежее и мороженое. Руководство по облучению для уничтожения паразитов, патогенных и иных микроорганизмов. – Введ. 2017-01-01.
28. International Atomic Energy Agency. Manual of Good Practice in Food Irradiation. Sanitary, Phytosanitary and Other Applications. Technical Reports Series No. 48I. 2015. 85 p.
29. Павлов АН, Чиж ТВ, Снегирев АС, Санжарова НИ, Черняев АР, Борщеговская ПЮ, и др. Технологический процесс радиационной обработки пищевой продукции и дозиметрическое обеспечение. *Радиационная гигиена*. 2020; 13 (4): 40-50.
Pavlov AN, Chizh TV, Snegirev AS, Sanzharova NI, Chernyaev AP, Borshegovskaya PYu, et al. Technological process of food irradiation and dosimetric support. *Radiation Hygiene*. 2020; 13 (4): 40-50. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2020-13-4-40-50> (In Russ).
30. Kume T, Furuta M, Todoriki S, Uenoyama N, Kobayashi Y. Status of food irradiation in the world. *Radiation Physics and Chemistry*. 2009; 78 (3): 222-6. <https://doi.org/10.1016/J.RADPHYSICHEM.2008.09.009>.
31. Radiation Processing Facility Market Size, Share & Growth. https://www.360researchreports.com/market-reports/radiation-processing-facility-market-200472?utm_source=chatgpt.com.
32. Сайт АО “Акцентр Технологии обработки”. <https://www.axenter.ru/>.
33. Сайт ООО “КНТП “КОРАД”. <https://corad.tech/kntp>.
34. Сайт АО “НИИЭФА”. <https://rkm.rosatom.ru/innov/pir-ipr/vertical/yaok/ao-niiefa/>.
35. Сайт ООО “РАД”. <https://www.rad04.org/>.
36. Сайт ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России. <https://fmbafmbc.ru>.
37. Сайт ООО “СФМ Фарм”. <https://catalog.ick.ru/sfm-farm,-ooo>.
38. Сайт Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. <https://www.inp.nsk.su>.
39. Сайт ИФХЭ РАН. <https://www.phyche.ac.ru/>.
40. Сайт УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. <https://urfu.ru/ru/>.
41. Сайт НИИЯФ МГУ. <http://www.sinp.msu.ru/>.
42. Сайт ФГБНУ “ВНИИРАЭ”. <http://iobninsk.ru/rirae/>.
43. Сайт ФИЦ ПХФ и МХ РАН. <https://www.icp.ac.ru/ru/>.
44. Innovating Radiation Processing of Food with Low Energy Beams from Machine Sources | IAEA. <https://www.iaea.org/projects/crp/d61025>.
45. The Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture | International Atomic Energy Agency. <https://www.iaea.org/ru/node/51439>.
46. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 021/2011 “О безопасности пищевой продукции” (с изм. от 23.06.2023).
47. Alum EA, Urom S, Ben CMA, et al. Microbiological contamination of food: the mechanisms, impacts and prevention. *Int J Sci Technol Res*. 2016; 5 (3): 65-78.
48. Хишов АС, Балагула ТВ, Третьяков АВ, Иванова ОЕ, Козеичева ЕС. Микробиологическая контаминация продовольственного сырья и готовой пищевой продукции (ана-

- литический обзор). Техника и технология пищевых производств. 2023; 53 (3): 486-503.
- Khishov AS, Balagula TV, Tretyakov AV, Ivanova OE, Kozeicheva ES. Microbiological Contamination of Food Raw Materials and Ready-To-Eat Foods: Analytical Review. Food Processing Techniques and Technology. 2023; 53 (3): 486-503. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2451> (In Russ).
49. Botulism. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/botulism>.
50. Wijtes T, McClure RJ, Zwietering MH, Roberts TA. Modelling bacterial growth of *Listeria monocytogenes* as a function of water activity, pH and temperature. Int J Food Microbiol. 1993; 18 (2): 139-49. [https://doi.org/10.1016/0168-1605\(93\)90218-6](https://doi.org/10.1016/0168-1605(93)90218-6).
51. Rodrigo D, Rosell CM, Martinez A. Risk of *Bacillus cereus* in Relation to Rice and Derivatives. Foods. 2021; 10 (2): 302. <https://doi.org/10.3390/foods10020302>.
52. Xylia P, Chrysargyris A, Botsaris G, Skandamis P, Tzortzakis N. Salmonella Enteritidis survival in different temperatures and nutrient solution pH levels in hydroponically grown lettuce. Food Microbiol. 2022; 102: 103898. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2021.103898>.
53. Matejcekova Z, Spodniakova S, Dujmic E, Lipcakova D, Valik L. Modelling growth of *Lactobacillus plantarum* as a function of temperature: Effects of media. Journal of food and nutrition research. 2019; 58 (2): 125-34.
54. Medvedova A, Vallk L, Studenicova A. The effect of temperature and water activity on the growth of *Staphylococcus aureus*. Czech Journal of Food Sciences. 2009; 27 (11): SII28-35. <https://doi.org/10.17221/204/2009-CJFS>.
55. Noor R, Islam Z, Munshi S, Rahman F. Influence of Temperature on *Escherichia coli* Growth in Different Culture Media. J Pure Appl Microbiol. 2013; 7 (2): 899-904.
56. Valero A, Perez-Rodriguez F, Carrasco E, Fuentes-Alventosa JM, Garcia-Gimeno RM, Zurera G. Modelling the growth boundaries of *Staphylococcus aureus*: Effect of temperature, pH and water activity. Int J Food Microbiol. 2009; 133 (1-2): 186-94.
57. Jeong S-G, Kang D-H. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella* Typhimurium, and *Listeria monocytogenes* in ready-to-bake cookie dough by gamma and electron beam irradiation. Food Microbiol. 2017; 64: 172-8. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2016.12.017>.
58. Pertsev NV, Tsaregorodtseva GE. A mathematical model of the dynamics of a population affected by harmful substances. Journal of Applied and Industrial Mathematics. 2011; 5: 94-103. <https://doi.org/10.1134/S199047891101011X>.
59. Aguirre JS, Rodriguez MR, Garcia de Fernando GD. Effects of electron beam irradiation on the variability in survivor number and duration of lag phase of four food-borne organisms. Int J Food Microbiol. 2011; 149 (3): 236-46. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2011.07.003>.
60. Kovacs M, Wojnarovits L, Homlok R, Tegze A, Mohacsi-Farkas C, Takacs E, et al. Changes in the behavior of *Staphylococcus aureus* strains in the presence of oxacillin under the effect of gamma radiation. Environmental Pollution. 2024; 340 (2): 122843. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122843>.
61. Ebrahim H, Abou ElNour S, Hammad A, Abuzeid M, Abdou D. Comparative effect of gamma and electron beam irradiation on some food borne pathogenic bacteria contaminating meat products. Egyptian Journal of Pure and Applied Science. 2022; 60 (1): 62-72. <https://doi.org/10.21608/ejaps.2022.119119.1021>.
62. Prakash B, Veeregowda BM, Krishnappa G. Biofilms: A survival strategy of bacteria. Curr Sci. 2003; 85 (9): 1299-307. <http://www.jstor.org/stable/24108133>.
63. Farkas J. Irradiation as a method for decontaminating food. Int J Food Microbiol. 1998; 44 (3): 189-204. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(98\)00132-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(98)00132-9).
64. Rajkowski KT, Niebuhr SE, Dickson J. Effect of Gamma or Beta Radiation on *Salmonella* DT 104 in Ground Pork. J Food Prot. 2006; 69 (6): 1430-3. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-69.6.1430>.
65. Maier RM, Pepper IL. Chapter 3 – Bacterial Growth. Environ Microbiol (Third edition). 2015. 37-56. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394626-3.00003-X>.
66. Iwanami S, Oda N. Theory of Survival of Bacteria Exposed to Ionizing Radiation: I. X and Rays. Radiat Res. 1985; 102 (1): 46-58. <http://www.jstor.org/stable/3576428>.
67. Schopf S, Gotzmann G, Dietze M, Gerschke S, Kenner L, Koenig U. Investigations Into the Suitability of Bacterial Suspensions as Biological Indicators for Low-Energy Electron Irradia-

- tion. *Front Immunol.* 2022; 13: 814767. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.814767>.
68. Saber H, Mirzaei Mahmoud Abadi V, Hassanshahian M, Hosseini Ranjbar A. The Effect of Radioactive Radiation on Growth Inhibition and Destruction of Food Spoilage Bacteria in Poultry Meat. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences.* 2022; 92: 629-36. <https://doi.org/10.1007/s40011-021-01307-1>.
69. Acai P, Valik L, Medved'ova A, Roskopf F. Modelling and predicting the simultaneous growth of *Escherichia coli* and lactic acid bacteria in milk. *Food Science and Technology International.* 2016; 22 (6): 475-84. <https://doi.org/10.1177/1082013215622840>.
70. Neal JA, Cabrera-Diaz E, Marquez-Gonzalez M, Maxim JE, Castillo A. Reduction of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* on Baby Spinach, Using Electron Beam Radiation. *J Food Prot.* 2008; 71 (12): 2415-20. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-71.12.2415>.
71. Mintier AM, Foley DM. Electron Beam and Gamma Irradiation Effectively Reduce *Listeria monocytogenes* Populations on Chopped Romaine Lettuce. *J Food Prot.* 2006; 69 (3): 570-4. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-69.3.570>.
72. Bouzarjomehri F, Dad V, Hajimohammadi B, Shirmardi SP, Yousefi-Ghaleh Salimi A. The effect of electron-beam irradiation on microbiological properties and sensory characteristics of sausages. *Radiation Physics and Chemistry.* 2020; 168: 108524. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108524>.
73. El-Aal HAHMA. Lipid Peroxidation End-Products as a Key of Oxidative Stress: Effect of Antioxidant on Their Production and Transfer of Free Radicals. *Lipid Peroxidation.* London: IntechOpen; 2012. <https://doi.org/10.5772/45944>.
74. Dominguez R, Pateiro M, Gagaoua M, Barba FJ, Zhang W, Lorenzo JM. A Comprehensive Review on Lipid Oxidation in Meat and Meat Products. *Antioxidants.* 2019;8(10):429. <https://doi.org/10.3390/antiox8100429>
75. Momchilova S, Kazakova A, Taneva S, Aleksieva K, Mladenova R, Karakirova Y, et al. Effect of Gamma Irradiation on Fat Content, Fatty Acids, Antioxidants and Oxidative Stability of Almonds, and Electron Paramagnetic Resonance (EPR) Study of Treated Nuts. *Molecules.* 2023; 28 (3): 1439. <https://doi.org/10.3390/molecules28031439>.
76. Chemat A, Song M, Li Y, Fabiano-Tixier A-S. Shade of Innovative Food Processing Techniques: Potential Inducing Factors of Lipid Oxidation. *Molecules.* 2023; 28 (24): 8138. <https://doi.org/10.3390/molecules28248138>.
77. Tomac A, Cova MC, Narvaiz P, Yeannes MI. Texture, color, lipid oxidation and sensory acceptability of gamma-irradiated marinated anchovy fillets. *Radiation Physics and Chemistry.* 2015; 106: 337-42. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2014.08.010>.
78. Cheng A, Wan F, Xu T, Du F, Wang W, Zhu Q. Effect of irradiation and storage time on lipid oxidation of chilled pork. *Radiation Physics and Chemistry.* 2011; 80 (3): 475-80. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2010.10.003>.
79. Ciesla K, Roos Y, Gluszewski W. Denaturation processes in gamma irradiated proteins studied by differential scanning calorimetry. *Radiation Physics and Chemistry.* 2000; 58 (3): 233-43. [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(99\)00380-1](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(99)00380-1).
80. Orynbekov D, Amirkhanov K, Kalibekkyzy Z, Muslimova N, Nurymkhan G, Nurgazezova A, et al. Effect of Electron-Beam Irradiation on Microbiological Safety, Nutritional Quality, and Structural Characteristics of Meat. *Foods.* 2025; 14 (9): 1460. <https://doi.org/10.3390/foods14091460>.
81. Del Mastro N. Radiation Influence on Edible Materials. *Radiation Effects in Materials.* London: IntechOpen; 2016. <https://doi.org/10.5772/62430>.
82. Dionisio AP, Gomes RT, Oetterer M. Ionizing radiation effects on food vitamins: a review. *Brazilian Archives of Biology and Technology.* 2009; 52 (5): 1267-78. <https://doi.org/10.1590/S1516-89132009000500026>.
83. Taofiq O, Fernandes B, Barros L, Barreiro MF, Ferreira ICFR. UV-irradiated mushrooms as a source of vitamin D2: A review. *Trends Food Sci Technol.* 2017; 70: 82-94. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.10.008>.
84. Louria DB, Acheson D. Food Irradiation: Unresolved Issues. *Clinical Infectious Diseases.* 2001; 33 (3): 378-80. <https://doi.org/10.1086/321907>.
85. Kilcast D. Effect of irradiation on vitamins. *Food Chem.* 1994; 49 (2): 157-64. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(94\)90152-X](https://doi.org/10.1016/0308-8146(94)90152-X).

86. Rock CL, Jacob R, Bowen PE. Update on the Biological Characteristics of the Antioxidant Micronutrients: Vitamin C, Vitamin E, and the Carotenoids. *J Am Diet Assoc.* 1996; 96 (7): 693-702. [https://doi.org/10.1016/S0002-8223\(96\)00190-3](https://doi.org/10.1016/S0002-8223(96)00190-3).
87. Zhang M, He L, Li C, Yang F, Zhao S, Liang Y, et al. Effects of gamma ray irradiation-induced protein hydrolysis and oxidation on tenderness change of fresh pork during storage. *Meat Sci.* 2020; 163: 108058. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108058>.
88. Bliznyuk U, Borshchegovskaya P, Chernyaev A, Ipatova V, Kozlov A, Khmelevskiy O, et al. Hemoglobin Derivatives in Beef Irradiated with Accelerated Electrons. *Molecules* 2023; 28 (15): 5773. <https://doi.org/10.3390/molecules28155773>.
89. Ahn DU, Kim IS, Lee EJ. Irradiation and additive combinations on the pathogen reduction and quality of poultry meat. *Poult Sci.* 2013; 92 (2): 534-45. <https://doi.org/10.3382/ps.2012-02722>.
90. Kozlova E, Bliznyuk U, Chernyaev A, Borshchegovskaya P, Braun A, Ipatova V, et al. Optimization Function for Determining Optimal Dose Range for Beef and Seed Potato Irradiation. *Foods* 2024; 13: 3729. <https://doi.org/10.3390/foods13233729>.
91. Zolotov SA, Bliznyuk UA, Antipina NA, Nikitchenko AD, Nikolaeva AA, Studenikin FR, et al. DosePreview Software for Rapid Planning of Radiation Processing of Biological Objects and Materials. *Physics of Atomic Nuclei.* 2024; 87: S452-60. <https://doi.org/10.1134/S1063778824701047>.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 11.03.2026. Принята к публикации: 17.06.2026.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Financing. The study had no sponsorship.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Article received: 11.03.2026. Accepted for publication: 17.06.2026.