

Электронно-лучевая обработка срезов мышечной ткани свинины в режимах радуризации

Канд. техн. наук **С.М. Орехова**

д-р хим. наук **А.П. Нечипоренко**, allanech2512@yandex.ru

Университет ИТМО

191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

У.Ю. Нечипоренко

Независимая лаборатория ИНВИТРО

196106, Россия, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 18

Методом электронной спектроскопии диффузного отражения (ЭСДО) проведено исследование оптических характеристик поперечных срезов цельномышечной ткани свинины, облученных пучком быстрых электронов мощностью 0,9 МэВ в режимах радуризации (6,5–25,0 кГр). Облучению подвергалась интактная мышечная ткань и ткань, прошедшая до облучения обработку 40% раствором этанола двумя способами, – контактным и в технике импульсного орошения. В пострадиационный период образцы хранились в течение трех месяцев в холодильной камере при 4°C. Регулярный контроль общей обсемененности образцов и морфологического состава развивающейся в процессе хранения микрофлоры осуществлялся микроскопированием отпечатков с их поверхности по методу Грама. Выявляли спектральное проявление процессов самореконструкции мышечной ткани в пострадиационный период в зависимости от поглощенной дозы излучения и способа обработки образцов этанолом. Показано, что спонтанные восстановительные процессы мышечного волокна обусловлены деструктивными процессами белковых компонентов саркоплазмы и соединительной ткани в зависимости от поглощенной дозы радиации, обеспечивающих систему строительным материалом за счет собственных ресурсов. Использование этанола в качестве стерилизующего агента позволило отметить ряд его функций пролонгированного действия, дополняющих и усиливающих действие электронного пучка, но снижающих при этом уровень радиационного порога. Даны рекомендации, позволяющие в течение длительного времени сохранять мышечную ткань свинины в свежем виде. Проведенные исследования показали уникальные возможности электронно-лучевого модифицирования твердых биологических систем, как метода направленного инициирования и исследования тех процессов, которые недоступны или затруднены для других методов.

Ключевые слова: мясные продукты; мышечная ткань; электронно-лучевой метод; электронная спектроскопия отражения.

DOI: 10.17586/2310-1164-2019-12-4-18-30

Electron beam treatment of pork muscle tissue sections in radurization modes

Ph. D. **Svetlana M. Orehova**

D. Sc. **Alla P. Nechiporenko**, allanech2512@yandex.ru

ITMO University

9, Lomonosov str., St. Petersburg, 191002, Russia

Ul'yana Yu. Nechiporenko

INVITRO Independent Laboratory

18, Blagodatnaya str., St. Petersburg, 196106, Russia

Diffuse reflection electron spectroscopy (ESDR) was used to study the optical characteristics of cross sections of whole muscle tissue of pork irradiated with a beam of fast electrons with a power of 0.9 MeV in radurization modes (6.5–25.0 kGr). Intact muscle tissue was exposed to radiation and treated with 40% ethanol solution in two ways – contact and pulse irrigation technique. During the irradiation period, the samples were stored for three months in a refrigerating chamber at 4°C. Regular monitoring of the total contamination of samples and morphological composition of the microflora developing during storage was carried out by microscopy of prints from their surface by the Gram method. The aim of the work was to identify the spectral manifestation of the processes of muscle tissue reconstruction itself in the irradiation period depending on the absorbed radiation dose and the method of treatment of samples with ethanol. It is shown that spontaneous regenerative processes of muscle fiber are caused by destructive processes of protein components of sarcoplasm

and connective tissue depending on the absorbed dose of radiation, providing the system with building material at the expense of its own resources. The use of ethanol as a sterilizing agent allowed us to note a number of its functions of prolonged action, complementing and enhancing the action of the electron beam, but reducing the level of the radiation threshold. Recommendations are given that allow for a long time to keep the muscle tissue of pork fresh. The research has shown unique possibilities of electron-beam modification of solid biological systems as a method of directed initiation and research of those processes which are inaccessible or difficult for other methods.

Keywords: meat products; muscle tissue; electron beam method; electron reflection spectroscopy.

Введение

Ионизирующие излучения – одно из уникальных явлений природы, физические особенности которых являются основой современных радиационных технологий стерилизации и консервирования пищевых продуктов [1, 2], практический интерес к которым возрастает [3–5]. Повышенный интерес к радиационным технологиям объясняется несовершенством применяемых в настоящее время методов консервирования и хранения мясопродуктов и других продуктов питания в свежем виде. Использование человеком лучистой энергии для стерилизации продуктов питания известно с незапамятных времен. Наши предки на протяжении многих столетий сушили и вялили мясо, рыбу, фрукты и овощи, то есть консервировали их под воздействием солнечной энергии. Идея использовать для консервирования энергию атома возникла после открытия Г. Беккерелем в 1896 году [6] естественной радиации.

В настоящее время ионизирующие излучения рекомендуют применять при хранении полуфабрикатов и кулинарных изделий, мяса, рыбы и других продуктов моря, скоропортящихся ягод и фруктов, концентратов фруктовых соков и другой сельскохозяйственной продукции [1, 7]. Радиационную стерилизацию используют при производстве пищи для космонавтов, больных, нуждающихся в стерильной диете, медицинских материалов и изделий (хирургические нити, одноразовые шприцы и пр.) [8, 9].

Радиационная стерилизация ионизирующим излучением с целью уничтожения возможной микрофлоры: насекомых, бактерий, вирусов, спор, грибов, плесени – это способ, во многом сходный с такими методами физической обработки, как нагревание или замораживание. Особенностью облучения является применяемая форма энергии [1, 2]. Специфика консервирования и стерилизации обработкой ионизирующими излучениями заключается в использовании атомных энергий разных диапазонов электромагнитного спектра, взаимодействующих с молекулами объекта и вызывающих их ионизацию, что не может быть достигнуто, например, простым нагреванием. «Ионизирующее излучение» – термин, который обобщает три вида лучистой энергии: гамма-, рентгеновское излучение и быстрые электроны.

Используемое в данной работе электронное излучение [1, 10] состоит из потока электронов, ускоренных в электрическом поле до скорости, близкой скорости света. Оно создается электрическими ускорителями с магнитной фокусировкой электронного пучка. Наиболее важным параметром при облучении пищевых продуктов является степень облучения, характеризуемая величиной поглощенной дозы излучения. Поглощенная доза – это физическая величина, определяющая количество энергии, поглощенной 1 килограммом пищевого материала. В Международной системе единиц за единицу дозы облучения принят Грей (Гр). Обычно в пищевой радиации доза измеряется в кГр (1000 Гр).

$$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг} = 100 \text{ рад.}$$

Рад – более ранняя единица измерения, но иногда используется в литературе и сейчас:

$$1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Дж/кг} (100 \text{ эрг/г, или } 6,242 \cdot 10^{13} \text{ эВ/г}); 1 \text{ Мрад} = 10 \text{ кГр.}$$

Лимитирующими факторами при выборе дозы облучения в радиационных технологиях является микробная порча и продление безопасной жизни пищевых продуктов. Для каждого вида продукции растительного и животного происхождения приняты международные стандарты [11], которые регламентируют допустимые дозы, необходимые для достижения определенных целей.

В настоящее время в качестве альтернативных методов разрушения некоторых включений патогенной микрофлоры в пищевых продуктах применяются пастеризация нагреванием, ультравысокое температурное консервирование, ультрафиолетовое излучение, озонирование, обработка оксидом этилена и др. Для карантинных целей – личинки насекомых могут быть уничтожены обработкой холодом, горячим воздухом и паром, обработкой токсичным озоноразрушающим бромистым метилом.

К числу других методов, позволяющих продлить жизнь продуктам питания, относятся вакуумирование, использование атмосферы разного состава при пакетировании (упаковке), замораживание, дегидратация, сублимационная сушка, обработка оксидом углерода.

В 1988 г ВОЗ [12, 13] суммирует преимущества технологий облучения по сравнению с обычными методами, применяемыми в пищевой промышленности, среди которых отмечается, что скоропортящиеся продукты могут храниться в свежем виде в 4–6 раза и более без заметной потери качества; обработка низкими дозами не снижает питательной ценности продукта; облученный продукт не становится радиоактивным, а химические изменения, вызванные облучением, практически не отличаются от изменений в результате других процедур обработки, например, нагревания. За последние годы появилось много публикаций [4, 14], авторы которых считают, что будущее в радиационных технологиях принадлежит быстрым электронам и X-лучам.

Заметим, что единой теории, объясняющей механизм действия излучения на биологические объекты нет. Два теоретических направления, прямого и косвенного воздействия, были предложены в результате многочисленных исследований, проведенных при облучении различных индивидуальных органических веществ, вирусов и бактерий. На сегодняшний день универсальной теорией радиобиологического действия ионизирующих излучений признана теория А.М. Кузина, предложенная в 1965 г. [15, 16]. Она основана на принципе многофакторности в проявлении любой радиобиологической реакции или эффекта: дискретный характер передачи энергии при действии ионизирующего излучения; при цепных радиобиологических реакциях, развивающихся во времени и имеющих место во время облучения и после него, одновременно происходят процессы повреждения и восстановления у всех структурных элементов облучаемого объекта.

Целью данной работы является исследование методом электронной спектроскопии диффузного отражения (ЭСДО) способности мышечной ткани «in vitro» к реконструктивным процессам, продлевающим сроки ее хранения в пострадиационный период. Известно [17, 18], что конечный положительный эффект радиационного облучения является результатом не только повреждений, но и последующих процессов восстановления. На возможность самосборки, например, белкового комплекса актомиозина мышечного волокна «in vitro» с образованием более плотных упорядоченных ассоциатов толстых и тонких нитей, чем у нативного актомиозина, указывают авторы работы [19]. Подавление и стабилизация осциллирующей активности тканевых ферментов при облучении [20] и достижение микробиологической стабильности увеличивает вероятность мышечной ткани к реконструкции. Следует отметить, что обратная положительная связь при стимулирующем действии ионизирующих излучений [6, 19] характерна не только для белковых структур, но и, как свидетельствуют литературные данные [21–23], проявляется при реконструкции углеводных полимеров, глико- и липопротеинов.

Объекты и методы исследования

Материалом для исследования в данной работе служили облученные пучком быстрых электронов поперечные срезы свежееохлажденной препарированной мышечной ткани свинины (белая порода, фермерское производство Новгородской области). Анатомическая часть – длиннейшая мышца спины. Отбор исходного материала требуемого качества контролировали методом ЭСДО по электронным спектрам поглощения поверхности цельномышечной ткани. Исследовались интактные (не подвергнутые обработке этанолом) образцы и образцы, прошедшие до облучения обработку раствором 40% этанола двумя способами – контактным (погружение в раствор при экспозиции 10 мин) и импульсным орошением из распылителя в подвешенном положении (экспозиция 5 мин и интервал орошения 1,0 мин). Выбор концентрации этанола и время обработки образцов проводился на основании предварительных экспериментальных данных [24].

После предварительной подготовки образцы ($m \approx 10$ г) упаковывались в ячейки планшетов из полиэтилентерефталатной пленки толщиной 0,06 мм с влаго- и газозащитным барьерным покрытием (поставщик – компания «Охта» Санкт-Петербург, изготовитель пленки – литовский завод Lietrak). Затем планшеты термически герметизировались (упаковка без доступа воздуха) и образцы подвергались облучению пучком быстрых электронов. Параллельно готовились аналогичные серии необлученных

образцов для аэробного (банки) хранения и хранения без доступа воздуха. Все образцы в пострадиационный период хранились в холодильной камере при $4 \pm 1^\circ\text{C}$ в течение 3-х месяцев.

Облучение герметизированных срезов мышечной ткани проводилось в НТК «Ядерная физика» Санкт-Петербургского Политехнического университета на среднеэнергетическом ускорителе РТЭ-1В (предприятие изготовитель – НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург) электронным пучком мощностью 0,9 МэВ. Поглощенная доза варьировалась в диапазоне 6,25–25,00 кГр.

ЭСДО-спектры получали на спектрофотометре Specord M-200 (AIZ Engineering GmbH, Германия) с вертикальным ходом луча относительно эталона Spectralon в диапазоне длин волн 200–700 нм в формате поглощения –

$$A = f(\lambda, \text{нм}),$$

где $A = \log(100/R)$ – поглощение;

λ – длина волны, нм;

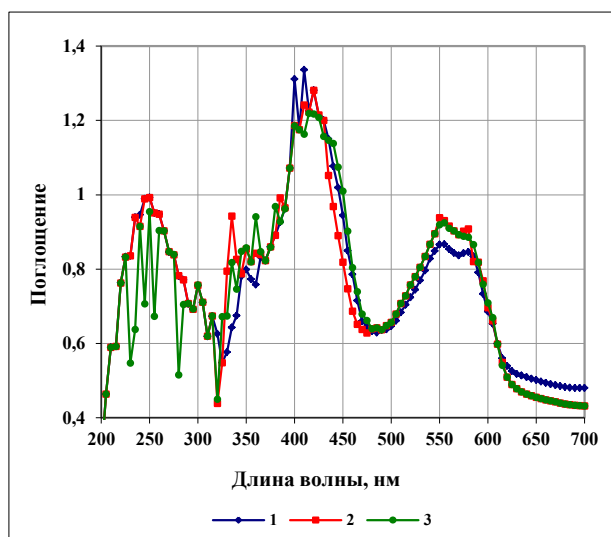
R – коэффициент отражения, %.

Анализ на суммарную обсемененность и морфологический тип микрофлоры в процессе хранения образцов осуществлялся микроскопированием окрашенных по Граму [25] отпечатков, взятых с их поверхности, на микроскопе марки Zeiss Axiostar plus (x1000) в независимой лаборатории ИНВИТРО. Образцы исследовались на изменение количества грамположительной и грамотрицательной микрофлоры и ее морфологический тип (палочки, кокки, бластоспоры, псевдомицелий). Тест позволяет классифицировать бактерии по окраске, разделяя их на две группы относительно строения клеточной оболочки. Количество микроорганизмов (Q) оценивали при просмотре 100 полей зрения в 2–3-х отпечатках с поверхности образцов (ед./100 п. зр.).

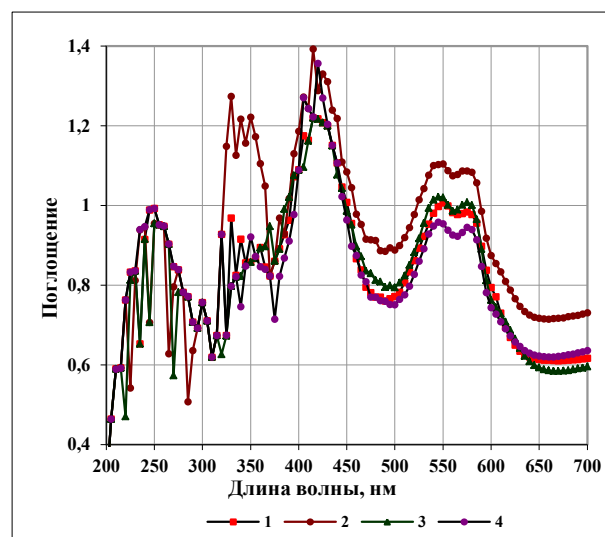
Результаты и их обсуждение

Влияние обработки 40% раствором этанола свежих срезов мышечной ткани, как это видно из спектров ЭСДО контрольных (не облученных) образцов на рисунке 1а, проявляется в областях поглощения белково-углеводных комплексов (200–300 нм [26, 27]), мукополисахаридов (400–425 нм [28]), дублета пигментного белка миоглобина (540/580 нм [29]), в изменении интенсивности полос поглощения липидных компонентов (300–380 нм [30]). Этанол, в общем, повышает цветность образцов (540/580 нм), что следует из роста полосы поглощения миоглобина при сохранении симметрии ее дублета, и интенсивность полос в области поглощения липидных компонентов, увеличивая их дифференциацию, снижает интенсивность полосы мукополисахаридов. Способ обработки наиболее заметно проявляется в области УФ-полосы (200–300 нм). Увеличение числа отрицательных экстремумов в этой области в спектре образца, прошедшего обработку импульсным орошением, указывает на разрушение значительного количества белок-углеводных связей.

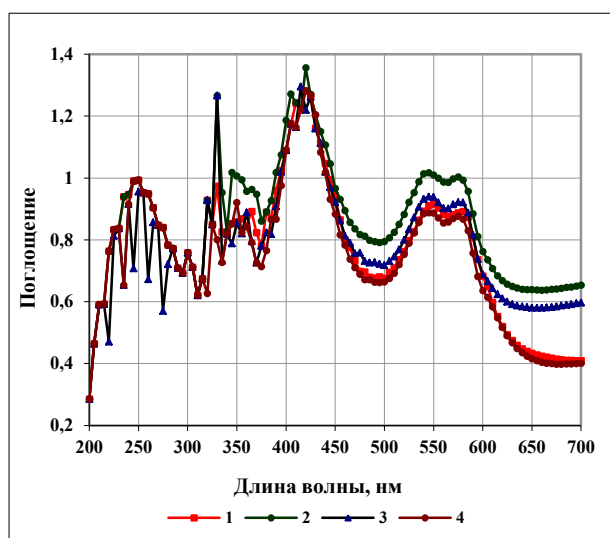
Влияние облучения лучше всего отражает рисунок 1б. Интактный срез мышечной ткани подвергается самым значительным изменениям, которые проявляются во всех курируемых областях электромагнитного спектра, и очень зависят от величины поглощенной дозы. Они меньше касаются белковых компонентов, но приводят к разрыву дисульфидных связей (отрицательный экстремум в области 230–235 нм). Сопоставление со спектрами на следующих фрагментах («в» и «г») рисунка, позволяет и в этом случае отметить очевидную роль этанола в стабилизации оптических характеристик поверхности срезов мышечной ткани, особенно в области проявления пигментного белка и липидных компонентов, и их варьруемой зависимости от величины поглощенной дозы. Следует отметить, что в этом эксперименте при облучении максимальную устойчивость показали образцы, прошедшие импульсное орошение этанолом. А также и то, что от способа обработки этанолом зависит и доза облучения, приводящая к наибольшей деструкции химических связей. При контактном способе это доза в 12,5 кГр, а в случае импульсного орошения – 18,75 кГр.



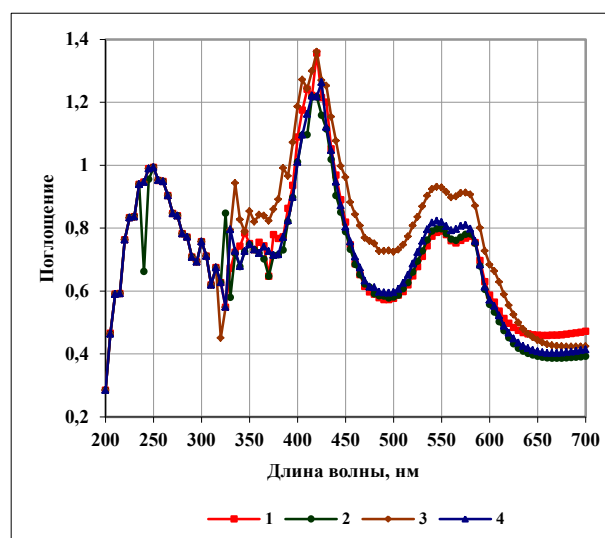
а) контрольные образцы



б) интактный образец



в) контактный способ



г) импульсное орошение

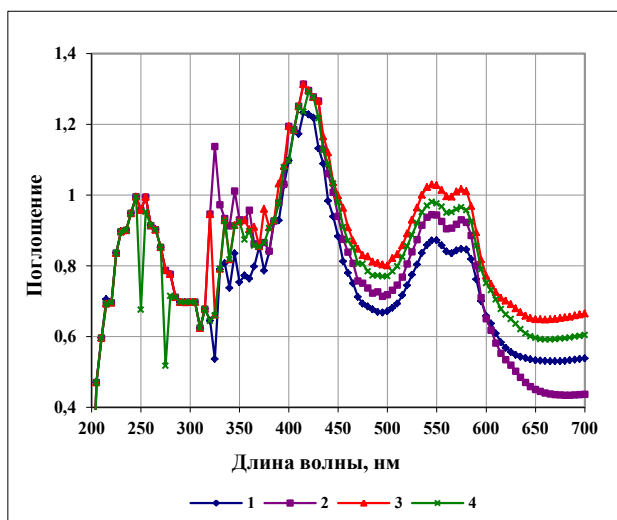
Рисунок 1 – ЭСДО-спектры поверхности контролей и облученных срезов мышечной ткани свинины в зависимости от способа обработки 40% этанолом через сутки после облучения:

а) 1 – контроль интактный; 2 – контактный способ; 3 – импульсное орошение; б), в), г) поглощенная доза: 1 – 6,25; 2 – 12,5; 3 – 18,75; 4 – 25,0 кГр

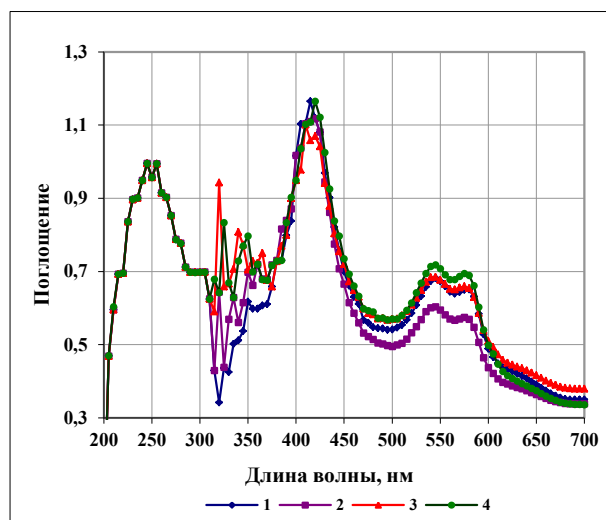
Figure 1. ESDR-specters for the surfaces of control and irradiated cross-sections of pork muscle tissue depending on the technique of treatment by 40% ethanol 24 hours after irradiation:

а) 1 – intact control; 2 – contact technique; 3 – pulse irrigation; б), в), г) absorbed dose: 1 – 6.25; 2 – 12.5; 3 – 18.75; 4 – 25.0 kGy

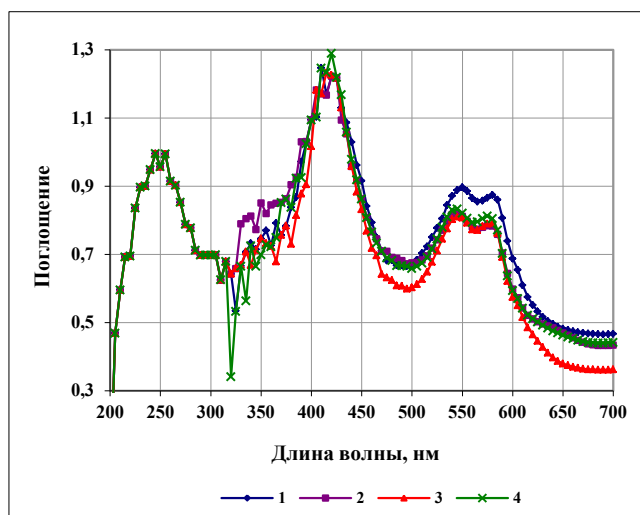
Рисунок 2 иллюстрирует изменение оптических свойств образцов этой серии через три месяца хранения. Лучшими, наиболее стабильными оптическими характеристиками, как следует из сопоставления всего комплекса полученных данных, и менее зависимыми от величины поглощенной дозы излучения обладали образцы, прошедшие обработку в технике импульсного орошения. Отсутствие отрицательных экстремумов в области УФ-полосы и ее колоколообразная форма свидетельствуют о наличии спонтанных реконструктивных процессов при хранении, протекающих за счет собственных ресурсов и обусловленных взаимодействующими стабилизирующими функциями электронного пучка и этанола.



Интактный образец



Контактный способ



Импульсное орошение

Рисунок 2 – Влияние поглощенной дозы и способа обработки 40 %-м этанолом на ЭСДО-спектры срезов мышечной ткани свинины через 3 месяца хранения. Поглощенная доза: 1 – 6,25; 2 – 12,5; 3 – 18,5; 4 – 25,0 кГр
 Figure 2. The influence of irradiated dose and the technique of treatment by 40% ethanol on ESDR-specters of pork muscle tissue cuts after three months of storage. Absorbed dose: 1 – 6.25; 2 – 12.5; 3 – 18.75; 4- 25.0 kGy

Результаты анализа образцов на микробиологическое состояние через три месяца хранения показали отсутствие микрофлоры во всех образцах, обработанных этанолом и облученных дозами 12,5–25,0 кГр. Остаточная микрофлора в статическом состоянии, как видно из таблицы, присутствовала только на срезах мышечной ткани, поглотивших дозу в 6,25 кГр. Однако на поверхности интактных образцов количество микроорганизмов заметно выше и, спустя примерно месяц, начинает увеличиваться. Обсеменение поверхности контролей, обработанных этанолом, происходит с некоторой задержкой, по сравнению с интактным контролем, но способ обработки при этом мало влияет на скорость размножения микроорганизмов. В остаточной микрофлоре (2–14 ед/100 п. зр.) на поверхности облученных образцов, предварительно обработанных этанолом, присутствовали только грамположительные кокки. Поверхность необлученных и интактных образцов зарастала микроорганизмами значительно быстрее, и в их составе к концу срока хранения наряду с кокками увеличивалось содержание грамположительных и грамотрицательных палочек.

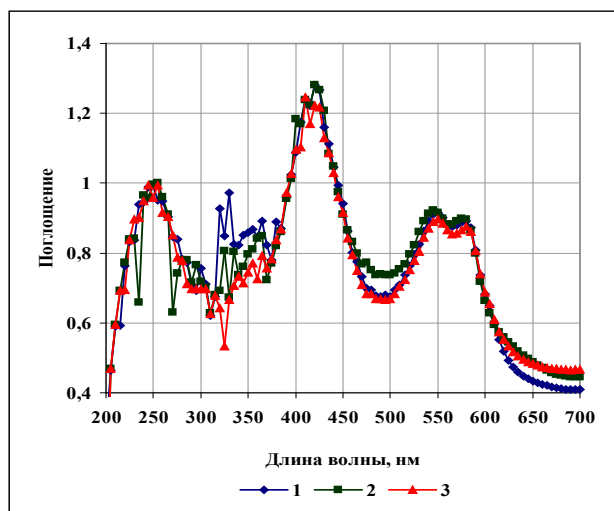
Таблица – Изменение количества микроорганизмов в отпечатках с поверхности облученных срезов цельномышечной ткани свинины в процессе хранения (Q, ед./100 п.зр).

Table. The changes in microorganism count in smears from the surface of irradiated cuts of pork muscle tissue during storage (Q, units./per 100 fields).

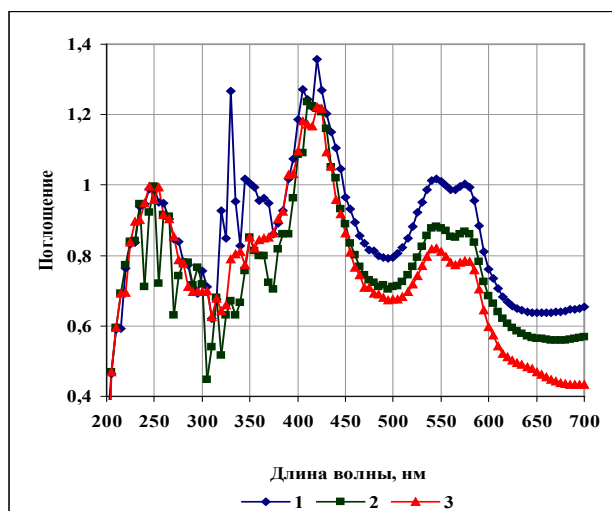
Продолжительность, сутки	Способ обработки 40% раствором этанола; поглощенная доза, кГр; суммарное содержание микрофлоры – ед/100 п. зр.						
	без обработки			контактный способ		импульсное орошение	
	0	6,25	12,5	0	6,25	0	6,25
1	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0
7	10	5	3	0	0	0	0
10	70	20	16	12	0	8	0
15	110	24	38	65	5	48	2
20	200	52	32	89	10	76	7
25	(360)	72	64	116	10	110	0
30	–	102	78	236	8	218	5
35	–	160	58	(402)	8	(380)	9
40	–	183	65	–	6	–	9
45	–	224	84	–	14	–	9
50	–	(280)	96	–	14	–	4
55	–	–	120	–	8	–	6
60	–	–	169	–	4	–	7
75	–	–	(250)	–	2	–	7
90	–	–	–	–	10	–	3

Электронные спектры, приведенные на рисунке 3, позволяют проследить изменение оптических свойств поверхности срезов мышечной ткани, подвергнутых импульсному орошению и облучению дозами 6,25 и 12,5 кГр в процессе хранения. Сопоставление полученных спектральных данных говорит в пользу дозы радиации в 6,25 кГр, позволяющей сохранить цветность образца при минимальном разбросе и колебаниях оптических показателей белково-углеводного комплекса, мукополисахаридов и пигментного белка при хранении. В спектральной области, где проявляют себя липидные компоненты, наблюдается закономерное снижение поглощения с увеличением срока хранения.

В связи с этим образцы срезов мышечной ткани, облученные дозами 6,25 и 12,5 кГр, были подвергнуты отмывке водой в течение 2-х часов с целью выявления влияния поглощенной дозы излучения на образование и выход водорастворимых соединений.



а) 6,25 кГр



б) 12,5 кГр

Рисунок 3 – Изменение ЭСДР-спектров поверхности срезов мышечной ткани, прошедших обработку импульсным орошением и облучение дозами 6,25 и 12,5 кГр, при хранении: 1 – 30; 2 – 60; 3 – 90 суток
Figure 3. The changes of ESDR-specters for the surface of muscle tissue cuts pulse irrigated and irradiated by 6.25 and 12.5 kGy stored at: 1 – 30; 2 – 60; 3 – 90 days

Из результатов, представленных на рисунке 4, видно, что влияние величины поглощенной дозы более наглядно проявляется в спектральных характеристиках срезов после частичного удаления с их поверхности водорастворимых компонентов мышечной ткани. Дифференциация полос в средней УФ области и относительно небольшое снижение поглощения в более длинноволновой области для образца, облученного дозой 6,25 кГр (рисунок 4а), позволяют предположить, что восстановительные процессы контрактивных белков в данном случае возможны за счет водорастворимых белков саркоплазмы. Однако они не обеспечивают их целостность при отмывке водой, что следует из серии отрицательных экстремумов на кривой 2 рисунка 4а.

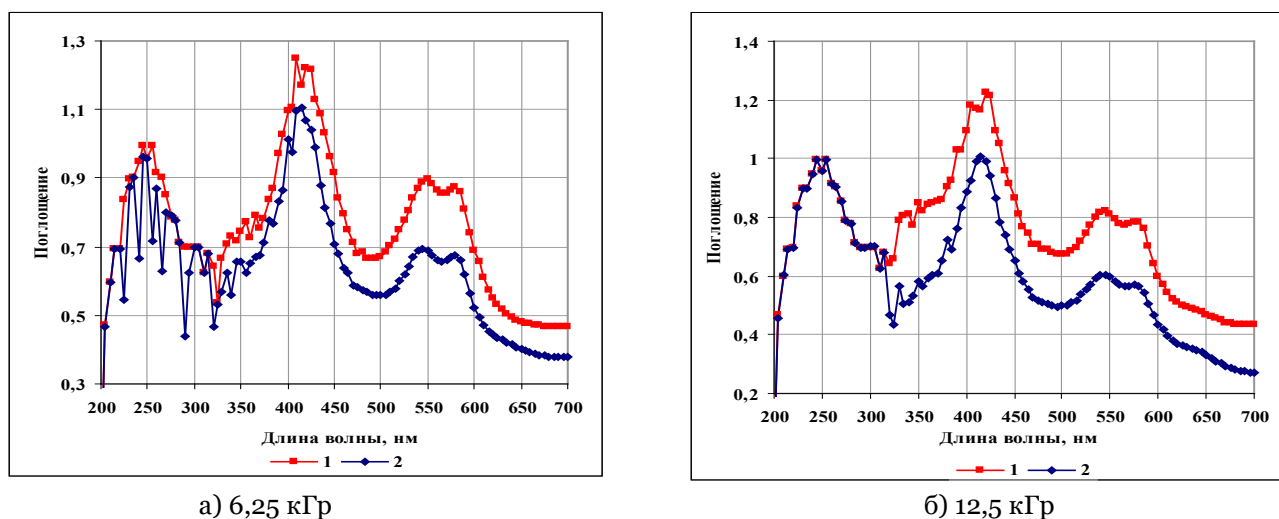


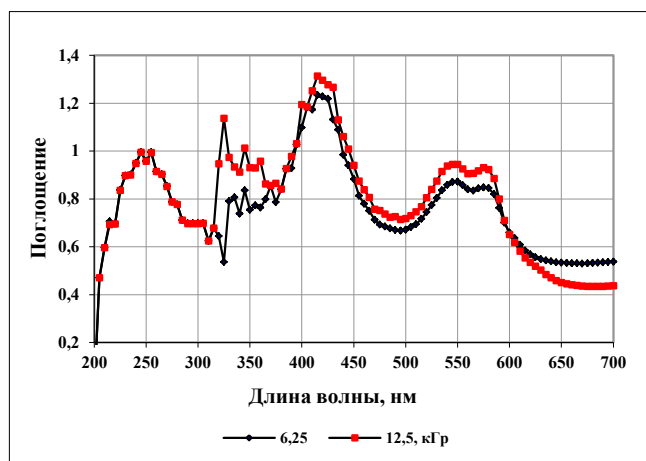
Рисунок 4 – ЭСДО-спектры облученных срезов мышечной ткани, обработанной в технике импульсного орошения, через три месяца: до (1) и после отмывки водой (2)

Figure 4. ESDR-specters for the surfaces of pulse irrigated pork muscle tissue cuts after three months: before (1) and after (2) water washing

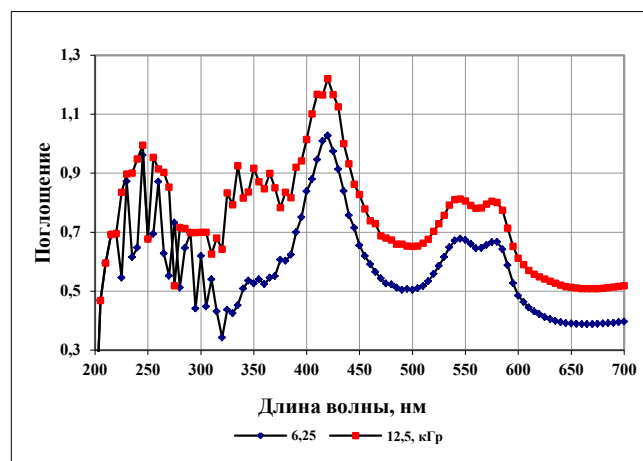
С ростом поглощенной дозы до 12,5 кГр наблюдается совпадение УФ фрагментов спектров мышечной ткани до и после отмывки водой. Однако более резкое снижение интенсивности полос липидов и мукополисахаридов после водной обработки может говорить об увеличении доли водорастворимых соединений этой категории. Наблюдаемый спектральный эффект дает основание предполагать, что в этом случае имеет место частичная деструкция компонентов соединительной ткани. А переход образовавшихся ее белковых фрагментов в растворимое состояние способствует реконструктивным процессам миофибрилярных белков, поскольку поступления из вне строительных материалов нет. Кроме того, известно, что мукополисахариды и особенно гиалуроновая кислота (их структурный элемент), входящие в состав биомембран и соединительной ткани животных, значительно более радиочувствительны и их распад обнаруживается при поглощении существенно меньших доз радиации (0,2–1,0 кГр) [22, 23]. Заметное разрушение коллагеновых волокон, как отмечают авторы [31], начинается при дозах выше 10 кГр.

На рисунке 5 (I) скомпонованы спектры ЭСДО для поверхности срезов интактной мышечной ткани, облученной дозами в 6,25 и 12,5 кГр, до («а») и после («б») отмывки водой. Представленные данные наглядно иллюстрируют не только наиболее заметное проявление величины поглощенной дозы после отмывки интактных срезов водой, но и стабилизирующее влияние электронно-лучевой стерилизации дозой в 12,5 кГр на оптические характеристики образца, по сравнению с дозой в 6,25 кГр.

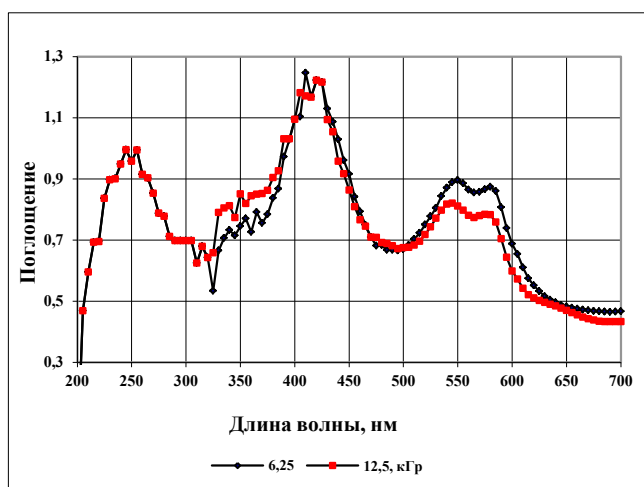
Импульсное орошение среза 40% раствором этанола, как следует из рисунков 5(II), процесс реконструкции интенсифицирует, повышая растворимость компонентов соединительной ткани, что следует из снижения интенсивности полосы поглощения мукополисахаридов.



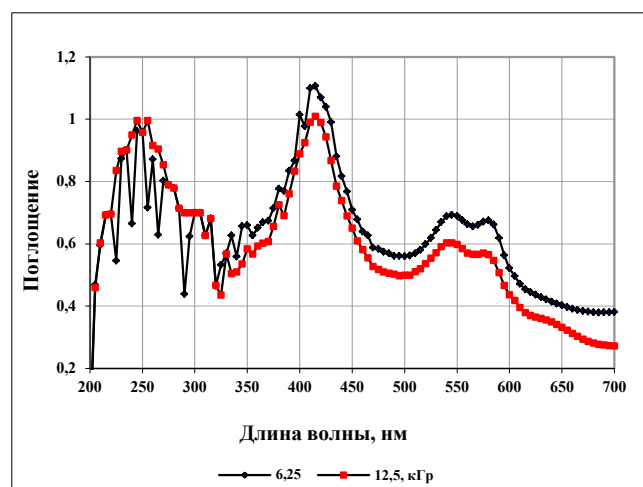
а)



б)



в)



г)

(I)

(II)

Рисунок 5 – Электронные спектры поверхности срезов мышечной ткани свинины через 3 месяца хранения: интактная (I) и импульсное орошение (II); а) и в) – до; б) и г) – после отмывки водой

Figure 5. Electronic specters for the surfaces of pork muscle tissue cuts after three months storage: intact (I) u pulse irrigation (II); а) and в) – before; б) and г) – after water washing

Обработка этанолом заметно влияет на выход водорастворимых соединений мышечной ткани (рисунок 6), увеличивая его вплоть до дозы 18,75 кГр. Облучение же дозой в 25 кГр приводит к формированию сглаженного контура полосы поглощения в области среднего ультрафиолета для среза интактной мышечной ткани и снижению эффективности обработки этанолом.

Очевидно, способность к самореконструкции белковых структур является одним из механизмов их природной «самозащиты». Однако на определенных временных этапах все же начинают доминировать реакции разрушения. В связи с этим следует отметить, что не только сдерживание активности ферментов, но и химическая поддержка реконструктивной способности белковых структур, с целью «самосохранения», способствует продлению сроков годности мясопродуктов [24].

Эффективность воздействия ионизирующих излучений на мышечную ткань – это результат комплексных взаимосвязанных и взаимообусловленных преобразований [17, 18]. Желаемый положительный эффект во многом зависит не только от степени исходной обсемененности материала, но и от интенсивности и характера автолитических изменений на момент облучения. Процессы достаточно глубокого автолиза не только не дают мышечной ткани «шанс» на восстановление, но и усугубляются облучением. Иллюстрацией этому могут служить данные, приведенные на рисунке 7, для рыхлой интактной мышечной ткани, которая имела заметные механические повреждения и серо-коричневый оттенок (кр. 1). О достаточно высокой степени окисленности образца можно судить по спектру пигментного белка – отсутствие полосы-дублета и высокое поглощение в области, где регистрируется метмиоглобин (635 нм).

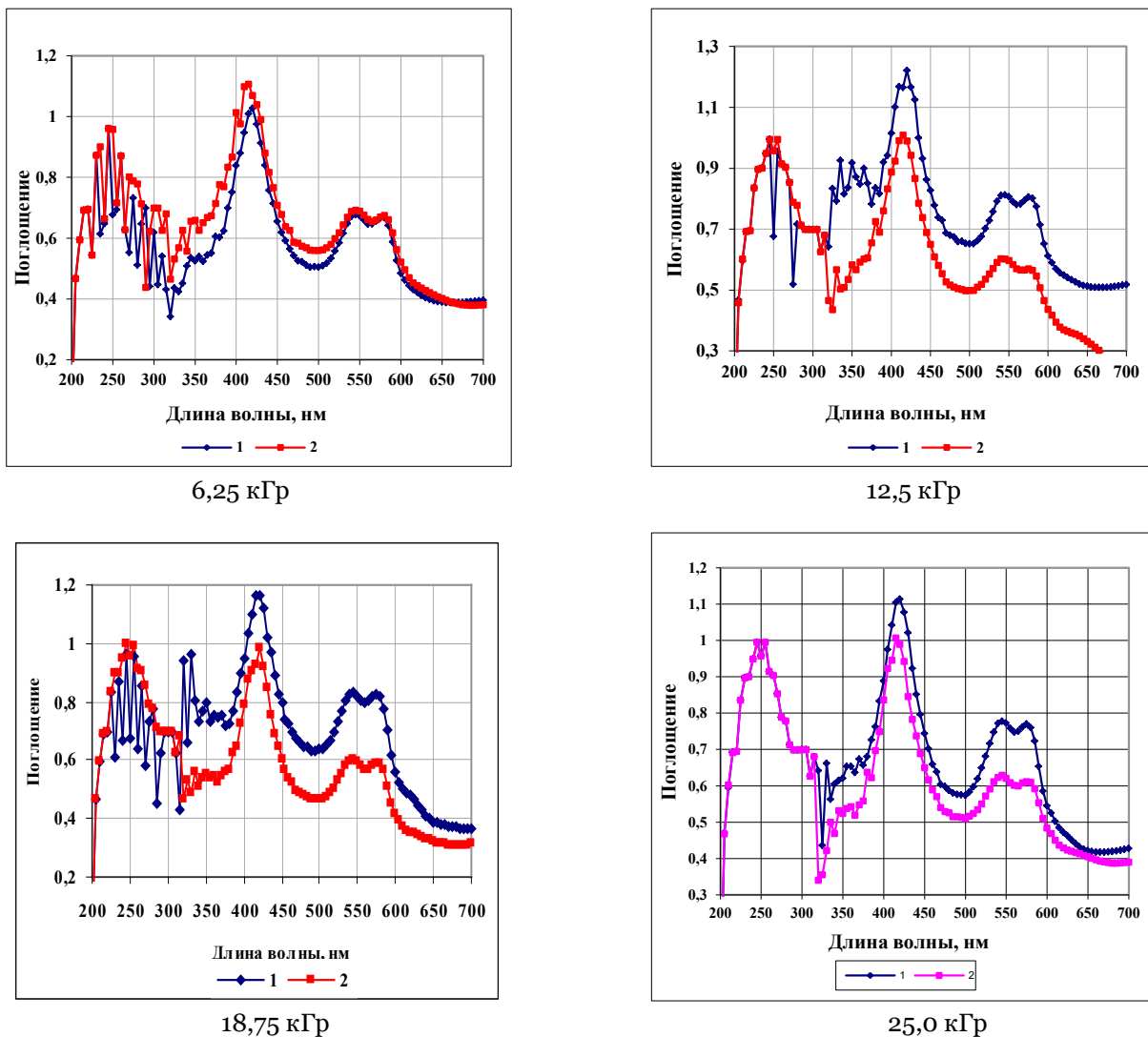


Рисунок 6 – ЭСДО-спектры отмытых срезов облученной мышечной ткани через 3 месяца хранения: 1 – интактная, 2 – импульсное орошение
 Figure 6. Electronic specters for the washed cuts of irradiated muscle tissue after three months storage: 1 – intact, 2 – pulse irrigation

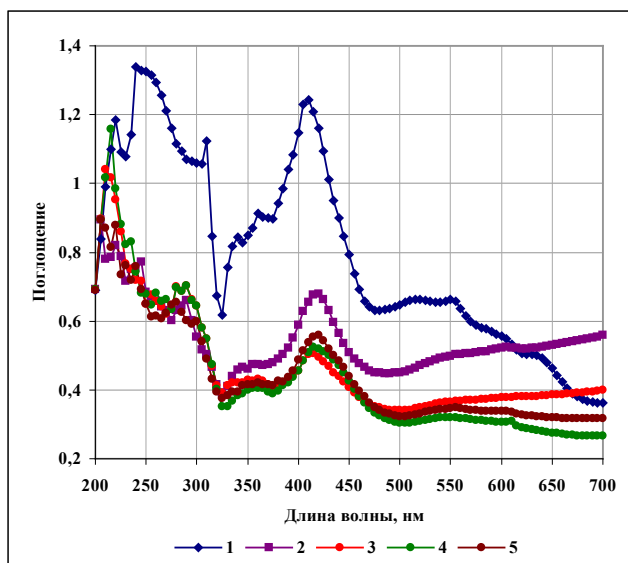


Рисунок 7 – ЭСДО-спектры интактной мышечной ткани плохого качества через 12 суток после облучения: 1 – мышечная ткань; мышечное волокно – поглощенная доза: 2 – 12,5; 3 – 25,0; 4 – 37,5; 5 – 50,0 кГр
 Figure 7. ESDR-specters of intact muscle tissue of bad quality 12 hours after irradiation: 1 – muscle tissue; muscle finer – absorbed dose: 2 – 12.5; 3 – 25.0; 4 – 37.5; 5 – 50.0 kGy

Водная обработка облученных образцов интактной мышечной ткани свинины не очень высокого качества показала (кривые 2–4), что через 12 суток хранения наблюдалась почти полная утилизация мышечного волокна, несмотря на высокие дозы ионизирующего излучения в достаточно широком диапазоне. Следует заметить, что метод ЭСДО, широко используемый сегодня в различных сферах медицинской практики [32, 33], пока не нашел должного применения в исследовательских лабораториях пищевых производств.

Заключение

Использование метода ЭСДО позволило наблюдать спектральное проявление реконструктивных процессов в нативных срезах интактной мышечной ткани свинины, подвергнутой облучению ускоренными электронами, способность к которым возрастает с увеличением поглощенной дозы излучения. В восстановительных процессах, по-видимому, участвуют все категории белков, но с разной долей вклада в них на разных этапах и в зависимости от поглощенной дозы радиации. При низких дозах (6,25 кГр) доминируют процессы, обусловленные водорастворимыми белковыми компонентами саркоплазмы. При более высоких дозах и с увеличением срока хранения преобладают процессы, связанные с деструкцией компонентов соединительной ткани и частичным переходом в растворимое состояние фрагментов коллагеновых волокон.

Обработка этанолом процессы реконструкции активизирует, снижая радиационный порог разрушения белково-мукополисахаридных компонентов. Это позволяет процессам восстановления доминировать над процессами разрушения, вызываемыми собственными тканевыми ферментами, понижая их осциллирующую активность и генерируя таким образом питательные среды [24], обуславливающие снижение количества микроорганизмов и селекцию остаточной Грам(+)-микрофлоры, преимущественно кокковой морфологии. О положительном влиянии химической обработки на качество образцов говорит отсутствие у них после облучения постороннего запаха, сохранение окраски и консистенции. Полученные экспериментальные данные позволяют рекомендовать для цельномышечной ткани импульсное орошение 40% этанолом в течение 5 минут с интервалами в 1,0–1,5 минуты и последующее облучение дозами 6,25–12,5 кГр в зависимости от целевого назначения продукта.

Литература

1. Васильев И.А., Нечаев А.Ф., Персиенен А.А. Введение в инженерную экологию. Радиационная технология: потенциал использования пиковолновой энергии для охраны здоровья и защиты окружающей среды. СПб.: Изд-во СПб. гос. технол. ин-та, 2000. 242 с.
2. Фрумкин М.Л. Перспективы использования ионизирующих излучений для интенсификации технологических процессов в пищевой промышленности // Радиационная обработка пищевых продуктов: сб. ст. М.: Атомиздат. 1971. С. 79–84.
3. O'Bryan C.F., Crandall P.G., Riche S.C., Olson D.G. Impact of irradiation on the safety and quality of poultry and meat products: a review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2008, V. 48, no. 5, pp. 442–457.
4. Fan X., Sommers C.H. *Food Irradiation Research and Technology*. NY.: Wiley-Blackwell, 2012. 472 p.
5. Чиж Т.В., Козьмин Г.В., Полякова Л.П., Мельникова Т.В. Радиационная обработка как технологический прием в целях повышения уровня продовольственной безопасности // Вестник Российской Академии естеств. наук. 2011. № 4. С. 44–49.
6. Ковальская Л.П., Гельфанд С.Ю., Климова Г.С. Радиационная обработка пищевых продуктов // Итоги науки и техники. Серия: Химия и технология пищевых продуктов. 1989. Т. 2. 156 с.
7. Osterholm M.T., Norgan A.P. The role of irradiation in food safety. *N. Engl. J. Med.* 2004, V. 350, no. 18, pp. 1898–1901.
8. Туманян М.А., Каушанский Д.А. Радиационная стерилизация. М.: Медицина, 1974. 304 с.
9. Осипов В.Б., Ракитская Г.А., Трофимов В.И. Актуальные вопросы радиационной стерилизации: практика применения в медицинской промышленности. Обзорная информация. Серия: Химико-фармацевтическая промышленность. М.: ЦБНТИ Медпрома, 1984. Вып. 9. 37 с.
10. Мякин С.В., Сычев М.М., Васильева И.В., Корсаков В.Г., Масленникова Л.Л. Электронно-лучевое модифицирование функциональных материалов. СПб.: Изд-во СПб. гос. ун-та путей сообщения, 2006. 105 с.
11. Общий стандарт на пищевые продукты, обработанные проникающим излучением. CODEX STAN 106-1983, REV. 1–2003. 5 с.
12. IAEA. Acceptance, Control of and Trade in Irradiated Food. *Conference Proceedings* (Geneva, 12–16 December 1988), STI/PUB/788, International Atomic Energy Agency, Vienna. 1989.

13. Кодекс Алиментариус. Облученные продукты питания. Совместная программа ФАО/ВОЗ по стандартам на пищевые продукты. М.: Весь Мир, 2007. 21 с.
14. Urbain W.M. Food irradiation: the past fifty years as prologue to tomorrow. *Food Technol.* 1989, V. 43, no. 7, pp. 76–92.
15. Кузин А.М., Каушанский Д.А. Прикладная радиобиология. М.: Энергоиздат, 1981. 224 с.
16. Каушанский Д.А., Кузин А.М. Радиационно-биологическая технология. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
17. Радиационное поражение и восстановление структуры и функций макромолекул / под ред. А.В. Савича. М.: Медицина, 1977. 280 с.
18. Кузин А.М. Стимулирующее действие ионизирующих излучений на биологические процессы. М.: Атомиздат, 1977. 133 с.
19. Шелудько Н.С., Кропачева И.В., Пермязова Т.В. Изменение размера частиц в суспензиях актомиозина в процессе суперпреципитации // Биохимия. 1993. Т. 58. № 12. С. 1936–1944.
20. Orlova M.A., Kost O.A., Gribkov V.A., Gazaryan I.G., Dubrovsky A.V., Egorov V.A., Troshina N.N. Enzyme activation and inactivation induced by low doses of irradiation. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 2000, V. 88, Is. 1–3, pp. 243–255.
21. Надарейшвили К.Ш., Егиазаров А.Р., Панделова И.Г., Хухашвили Д.Н., Мхчян В.А. Влияние ионизирующих излучений, серотонина и мексамина на свойства молекул сывороточных белков и белок-липидное взаимодействие // Материалы симпозиума «Механизм действия ионизирующих излучений на структуру и функции белков» (Львов, 25–27 ноября, 1986). Пушино: НЦБИ АН СССР. 1986. С. 9–10.
22. Кочетков Н.К., Кудряшов Л.И., Членов М.А. Радиационная химия углеводов. М.: Наука, 1978. 287 с.
23. Cavatorta P., Crippa P.R., Vecli A. Radiation effects in glycoproteins and related carbohydrates. *Int. J. Radiat. Phys. Chem.* 1971, V. 3, pp. 490–498.
24. Орехова С.М., Нечипоренко А.П. Радуризация мышечной ткани свинины // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2014. № 1. С. 273–283.
25. Сидоренко О.Д., Жукова Е.В., Пастух О.Н. Микробиологический контроль продуктов животноводства. М.: Изд-во Московск. с.-х. академ., 2002. 220 с.
26. Демченко А.П. Ультрафиолетовая спектрофотометрия и структура белков. Киев: Наукова думка, 1981. 208 с.
27. Элиас П.С., Кохен А.Дж. Радиационная химия основных компонентов пищевых продуктов. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. 221 с.
28. Орехова С.М. Радиационно-химическое консервирование мышечной ткани свинины: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2014. 149 с.
29. Антипова Л.В., Глотова И.А., Рогов И.А. Методы исследования мяса и мясных продуктов. М.: Колос, 2001. 376 с.
30. Нечипоренко У.Ю., Плотникова Л.В., Мельникова М.И. Липиды, их купажи, масляные экстракты и шроты растительного сырья. Оптические свойства. Рига. Lambert Academic Publishing, 2019. 156 с.
31. Demeter M., Meltzer V., Sima E., Virgolici M., et al. Characterization of electron beam irradiated collagen–polyvinylpyrrolidone (PVP) and collagen–dextran (DEX) blends. *Digest J. Nanomaterials and Biostructures.* 2011. V. 6, no. 4, pp. 1793–1803.
32. Стратоников А.Н., Меерович Г.А., Рябова А.В., Савельева Т.А., Лоценов В.Б. Использование спектроскопии обратного диффузного отражения света для мониторинга состояния тканей при фотодинамической терапии // Квантовая электроника. 2006. Т. 36. № 12. С. 1103–1110.
33. Munoz A., Montiel S.V.Y. Retrieving the optical parameters of biological tissues using diffuse reflectance spectroscopy and Fourier series expansions. I. theory and application. *Biomed. Opt. Express.* 2012. V. 3, no. 10, pp. 2395–2404.

References

1. Vasiliev I A., Nechaev A.F., Persinen A.A. *Introduction to engineering ecology. Radiation technology: the potential of using microwave energy to protect health and the environment.* St. Petersburg, St. Petersburg State Institute of Technology Publ., 2000. 242 p. (In Russian).
2. Frumkin M.L. Prospects of using ionizing radiation for intensification of technological processes in the food industry. In: *Radiation Treatment of Food.* Moscow, Atomizdat Publ., 1971, pp. 79–84 (In Russian).
3. O'Bryan C.F., Crandall P.G., Ricke S.C., Olson D.G. Impact of irradiation on the safety and quality of poultry and meat products: a review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2008, V. 48, no. 5, pp. 442–457.
4. Fan X., Sommers C.H. *Food Irradiation Research and Technology.* NY.: Wiley-Blackwell, 2012. 472 p.
5. Chizh T. V., Kozmin G.V., Polyakova L.P., Melnikova T.V. Radiation treatment as a technological technique in order to increase the level of food security. *Herald of Russian Academy of Natural Sciences.* 2011, no. 4, pp. 44–49 (In Russian).
6. Kovalskaya L.P., Gelfand S.Yu., Klimova G.S. Radiation treatment of food products. *Results of Science and Technology. Series: Food Chemistry and Technology.* 1989, V. 2, 156 p. (In Russian).
7. Osterholm M.T., Norgan A.P. The role of irradiation in food safety. *N. Engl. J. Med.* 2004, V. 350, no. 18, pp. 1898–1901.

8. Tumanyan M.A., Kushansky D.A. Radiation sterilization. Moscow: Medicine Publ., 1974. 304 p. (*In Russian*).
9. Osipov V.B., Rakitskaya G.A., Trofimov V.I. *Actual issues of radiation sterilization: practice of application in the medical industry*. Overview information. Series: Chemical and pharmaceutical industry. Moscow, 1984. Is. 9, 37 p. (*In Russian*).
10. Myakin S.V., Sychev M.M., Vasil'eva I.V., Korsakov V.G., Maslennikova L.L. *Electron beam modification of functional materials*. St. Petersburg, St. Petersburg State University of Railway Transport Publ., 2006. 105 p. (*In Russian*).
11. *General standard for food products treated with penetrating radiation*. CODEX STAN 106-1983, Rev, 1-2003. 5 c.
12. IAEA. Acceptance, Control of and Trade in Irradiated Food. *Conference Proceedings* (Geneva, 12–16 December 1988), STI/PUB/788, International Atomic Energy Agency, Vienna. 1989.
13. *Codex alimentarius. Irradiated food. Joint FAO/who food standards programmer*. Moscow, Whole World Publ., 2007. 21 p.
14. Urbain W.M. Food irradiation: the past fifty years as prologue to tomorrow. *Food Technol.* 1989, V. 43, no. 7, pp. 76–92.
15. Kuzin, A.M., Kaushansky D.A. Applied radiobiology. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 224 p. (*In Russian*).
16. Kaushansky D.A., Kuzin A.M. Radiation-biological technology. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 152 p. (*In Russian*).
17. *Radiation damage and restoration of structure and functions of macromolecules*. In ed. A.V. Savich. Moscow, Medicine Publ., 1977, 280 p. (*In Russian*).
18. Kuzin A.M. *The stimulating effect of ionizing radiation on biological processes*. Moscow, Atomizdat Publ., 1977. 133 p. (*In Russian*).
19. Sheludko N.S., Kropacheva I.V., Permyakova T.V. Particle size change in actomyosin suspensions during superprecipitation. *Biochemistry*. 1993, V. 58, no. 12, pp. 1936–1944 (*In Russian*).
20. Orlova M.A, Kost O.A., Gribkov V.A., Gazaryan I.G., Dubrovsky A.V., Egorov V.A., Troshina N.N. Enzyme activation and inactivation induced by low doses of irradiation. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 2000, V. 88, Is. 1–3, pp. 243–255.
21. Nadareishvili K.Sh., Egiazarov A.R., Pandelova I.G., Khukhashvili D.N., Mkhchyan V.A. Influence of ionizing radiation, serotonin and mexamine on the properties of serum protein molecules and protein-lipid interaction. *Proceeding symposium "The mechanism of action of ionizing radiation on the structure and function of proteins"* (Lviv, November 25–27, 1986). Pushchino, 1986, pp. 9–10 (*In Russian*).
22. Kochetkov N.K., Kudryashov L.I., Chlenov M.A. *Radiation chemistry of carbohydrates*. Moscow, Nauka Publ., 1978. 287 p. (*In Russian*).
23. Cavatorta P., Crippa P.R., Vecli A. Radiation effects in glycoproteins and related carbohydrates. *Int. J. Radiat. Phys. Chem.* 1971, V. 3, pp. 490–498.
24. Orehova S.M., Nechiporenko A.P. Radurization of pork muscle tissue. *Processes and Food Production Equipment*. 2014, no. 1, pp. 273–283 (*In Russian*).
25. Sidorenko O.D., Zhukova E.V., Pastukh O.N. *Microbiological control of animal products*. Moscow, Moscow Agricultural Academy Publ., 2002, 220 p. (*In Russian*).
26. Demchenko A.P. *Ultraviolet spectrophotometry and protein structure*. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1981. 208 p.
27. Elias P.S., Cohen A.J. *Radiation chemistry of the main components of food products*. Moscow, Light and Food Industry Publ., 1983, 221 p. (*In Russian*).
28. Orehova S.M. Radiation-chemical preservation of pork muscle tissue. *Candidate's thesis*. St. Petersburg, 2014. 149 p. (*In Russian*).
29. Antipova L.V., Glotova I.A., Rogov I.A. *Methods of research of meat and meat products*. Moscow, Kolos Publ., 2001. 376 p. (*In Russian*).
30. Nechiporenko U.Yu., Plotnikova L.V., Melnikova M.I. Lipids, their blends, oil extracts and meal of vegetable raw materials. Optical property. Riga, Lambert Academic Publishing, 2019. 156 p. (*In Russian*).
31. Demeter M., Meltzer V., Sima E., Virgolici M., et al. Characterization of electron beam irradiated collagen–polyvinylpyrrolidone (PVP) and collagen–dextran (DEX) blends. *Digest J. Nanomaterials and Biostructures*. 2011. V. 6, no. 4, pp. 1793–1803.
32. Stratonikov A.N., Meerovich G.A., Ryabova A.V., Savel'eva T.A., Loshchenov V.B. Use of reverse diffuse light reflection spectroscopy to monitor the state of tissues in photodynamic therapy. *Quantum Electronics*. 2006, V. 36, no. 12, pp. 1103–1110 (*In Russian*).
33. Munoz A., Montiel S.V.Y. Retrieving the optical parameters of biological tissues using diffuse reflectance spectroscopy and Fourier series expansions. I. theory and application. *Biomed. Opt. Express*. 2012. V. 3, no. 10, pp. 2395–2404.

Статья поступила в редакцию 01.11.2019