

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-1-11-19>

ВОЗДЕЙСТВИЕ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ЛЕТУЧИЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ В МЯСЕ ПТИЦЫ И В РЫБЕ

© Ульяна Александровна Близняук^{1,2}, Полина Юрьевна Борщеговская^{1,2}, Тимофей Александрович Болотник³, Виктория Сергеевна Ипатова², Александр Денисович Никитченко¹, Олег Юрьевич Хмелевский¹, Александр Петрович Черняев^{1,2}, Игорь Александрович Родин^{3,4*}

¹ Физический факультет Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

² Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына, Россия, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

³ Химический факультет Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 3; *e-mail: igorrodin@yandex.ru

⁴ Первый МГМУ имени И. М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), кафедра эпидемиологии и доказательной медицины, Россия, 119435, Москва, Б. Пироговская ул., д. 2, стр. 2.

*Статья поступила 21 октября 2022 г. Поступила после доработки 21 октября 2022 г.
Принята к публикации 24 ноября 2022 г.*

Потребность в развитии безопасных методов обработки пищевой продукции в целях повышения ее качества и продления сроков хранения влечет новые научные исследования, направленные на повышение эффективности радиационной обработки продуктов питания. В продуктах с высоким содержанием жира и воды, таких, как охлажденная мясная и рыбная продукция, под действием ионизирующего излучения происходит перекисное окисление липидов, приводящее к образованию в продукте летучих органических соединений, которые ответственны за специфический запах и вкус продукции. Метод газовой хромато-масс-спектрометрии позволяет идентифицировать химические изменения, происходящие в продукте после воздействия радиации. Экспериментальные данные о содержании летучих органических соединений в образцах охлажденного мяса индейки и семги после облучения ускоренными электронами с энергией 1 МэВ в диапазоне доз от 0,25 до 2 кГр показали, что зависимости концентраций спиртов, альдегидов и кетонов от дозы облучения в различных видах охлажденной продукции демонстрируют как общие, так и различные тенденции. Предложенная математическая модель описывает зависимости концентраций спиртов, альдегидов и кетонов в образцах мясной и рыбной продукции от дозы в диапазоне от 0,25 до 2 кГр и построена с учетом одновременного протекания двух конкурирующих процессов: распада соединений за счет их окисления и накопления за счет окисления других соединений после воздействия ионизирующего излучения.

Ключевые слова: радиационная обработка продуктов питания; семга; индейка; ускоритель электронов; парофазный анализ; газовая хроматография с масс-спектрометрическим детектированием (ГХ-МС); летучие органические соединения; математическая модель.

THE IMPACT OF ACCELERATED ELECTRONS ON VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS IN POULTRY AND FISH

© Ulyana A. Bliznyuk^{1,2}, Polina Yu. Borshchegovskaya^{1,2}, Timofey A. Bolotnik³, Victoria S. Ipatova², Alexander D. Nikitchenko¹, Oleg Yu. Khmelevsky¹, Alexander P. Chernyaev^{1,2}, Igor A. Rodin^{3,4*}

¹ Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, 1-2, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia.

² Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Russia, 1-2, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia.

³ Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University, 1-3, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia; *e-mail: igorrodin@yandex.ru

⁴ I. M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University), Department of Epidemiology and Evidence-Based Medicine, 2-2, B. Pirogovskaya ul., Moscow, 119435, Russia.

Received October 21, 2022. Revised October 21, 2022. Accepted November 24, 2022.

The necessity of developing safe methods of processing food products which improve the quality and extend their shelf life entails further scientific research aimed at increasing the efficiency of radiation pro-

cessing of food products. Ionizing radiation causes lipid peroxidation in the items with a high fat and water content, such as chilled meat and fish products, which leads to formation of organic volatile compounds that render the food the specific flavor and smell. Gas chromatography-mass spectrometry is a technique that provides identification of chemical changes that actually occur in the product after irradiation. Experimental data on the content of organic volatile compounds in chilled turkey and salmon meat samples exposed to irradiation with 1 MeV accelerated electrons in the dose range from 0.25 to 2 kGy revealed both common and different trends in the behavior of dose dependences of alcohol, aldehyde and ketone contents in various types of chilled products. A proposed mathematical model based on the possibility of simultaneous occurrence of two competing processes, i.e., the decomposition of compounds due to their oxidation and the accumulation of compounds due to oxidation of other compounds after exposure to ionizing radiation match a dose dependent character of experimental data.

Keywords: radiation processing of food; salmon; turkey; electron accelerator; headspace analysis; gas chromatography mass spectrometry (GC-MS); volatile organic compounds; mathematical model.

Введение

Ежегодно в России растет потребность в качественной и безопасной с точки зрения содержания токсичных веществ и микробиологического загрязнения мясной и рыбной продукции, а также в мясе птицы. Из-за нарушения логистических цепочек и несоблюдения санитарно-эпидемиологических норм на всех этапах производства возможно существенное снижение качества и безопасности продукции. В связи с этим актуальным является развитие радиационных технологий для их применения в области пищевой и сельскохозяйственной продукции как альтернативы химическим и термическим методам обработки продуктов питания [1 – 3].

Радиационная обработка продуктов питания позволяет не только решить задачу снижения микробной загрязненности, но и обеспечивает продление сроков годности продукции как с использованием экологических антиоксидантов [4 – 6], так и без них [7, 8]. Многочисленными исследованиями подтверждена высокая эффективность использования радиационной обработки в отношении отдельных категорий продукции, таких, как сухие специи, крупы, чай и травы, различные виды порошков, фрукты, корнеплоды и т.д. [9 – 12]. Для охлажденного мяса и рыбы данный метод обработки представляет собой сложную технологическую задачу из-за необходимости соблюдения равномерности распределения дозы свыше 80 % по объему обрабатываемой продукции [13, 14]. Несоблюдение однородности обработки может повлечь с одной стороны недооблучение отдельных частей продукта и, как следствие, недостаточное подавление микробиологической обсемененности продукции, а с другой стороны — переоблучение отдельных частей продукции, что может вызвать существенные изменения ее химических свойств с негативными изменениями внешнего вида, цвета и запаха продукта [15].

При воздействии ионизирующего излучения на основные компоненты охлажденных мясных и рыбных продуктов, содержащих воду, одними из

наиболее чувствительных являются липиды, в состав которых входят жирные кислоты [16, 17]. Образованные при радиоллизе воды гидроксильные радикалы вызывают процессы окисления насыщенных и ненасыщенных жирных кислот, которые в результате радикальных реакций распадаются на летучие соединения (рис. 1).

Широко применяемым способом оценки химических изменений пищевой продукции является метод газовой хроматографии в сочетании с масс-спектрометрией (ГХ-МС). Вследствие высокой чувствительности метод ГХ-МС позволяет идентифицировать в продукте широкий диапазон органических соединений: жирных кислот, летучих веществ, белков, аминокислот, углеводов и др. [18]. Выявление закономерностей изменения содержания различных органических соединений в продуктах в зависимости от дозы облучения способствует пониманию физико-химических процессов, протекающих в пищевой продукции после воздействия ионизирующего излучения, и помогает определить оптимальные дозовые диапазоны для радиационной обработки различных категорий мясной и рыбной продукции.

Группа исследователей физического и химического факультетов МГУ имени М. В. Ломоносова в содружестве с НИИЯФ МГУ имени Д. В. Скобелыцина проводит исследования по влиянию различных физических параметров излучения на изменение микробиологических и физико-химических свойств охлажденной мясной и рыбной продукции, что может способствовать выработке уточняющих рекомендаций по радиационной обработке отдельных категорий продукции [19 – 23].

Цель данной работы — выявление зависимостей концентраций летучих органических соединений в мясе индейки и семги от дозы облучения при воздействии пучком ускоренных электронов с энергией 1 МэВ.

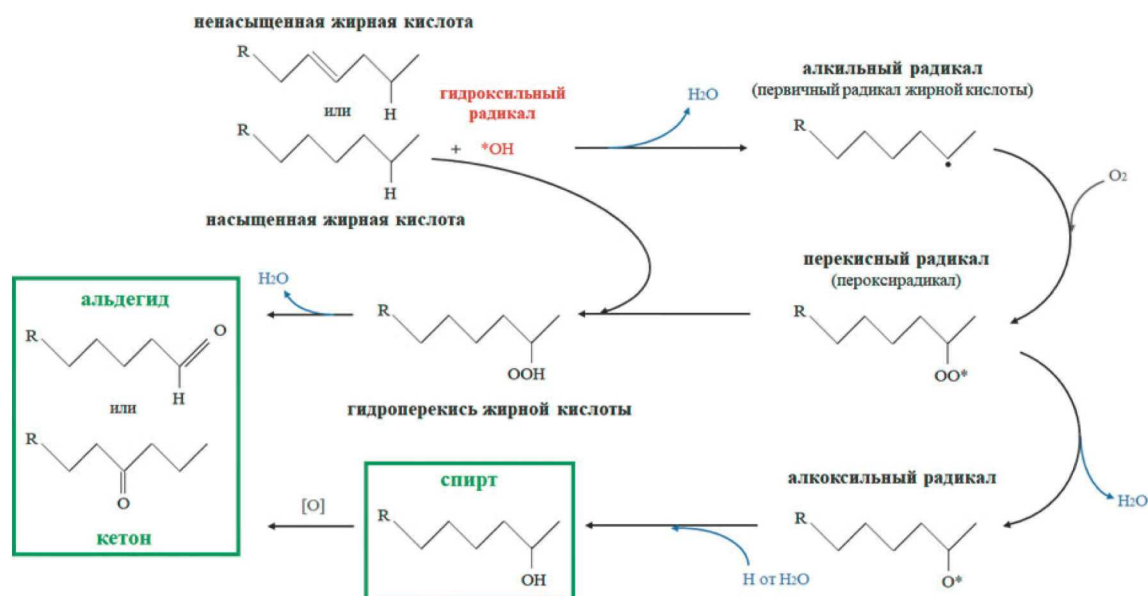


Рис. 1. Условная схема радиационно-индуцированного распада насыщенных и ненасыщенных жирных кислот на летучие органические соединения

Fig. 1. Conditional scheme of radiation-induced decomposition of saturated and unsaturated fatty acids into volatile organic compounds

Экспериментальная часть

В качестве объектов исследования были выбраны филе охлажденной индейки и семги, которые хранились в холодильной камере при температуре 4 °С не более двух дней с момента забоя.

Для обеспечения однородного облучения образцы продукции массой $0,5 \pm 0,1$ г и толщиной не более 3 мм помещали в пластиковые микроцентрифужные пробирки Эппендорфа (АО «РЗП», Россия) объемом 2 мл. Было подготовлено по 60 пробирок с образцами индейки и семги, для каждого образца проводили три параллельных определения.

Одностороннее облучение образцов осуществляли с использованием ускорителя электронов непрерывного действия УЭЛР-1-25-Т-001 (производитель — НИИЯФ МГУ совместно с АО НПП «Торий», Россия) с максимальной энергией электронов 1 МэВ при температуре окружающей среды 20 °С. Образцы выкладывали на дюралюминиевую пластину по 8 штук в соответствии со схемой облучения, приведенной в работе [24]. Дозу, поглощенную образцами, оценивали посредством компьютерного моделирования с использованием инструментария GEANT 4 [24] (ЦЕРН, Швейцария) с учетом заряда, поглощенного дюралюминиевой пластиной. Погрешность определения заряда, который измеряли с помощью АЦП (ООО «Производственное объединение ОВЕН», Россия), не превышала 2 %. Средний ток пучка составлял 0,1 мкА. Таким образом, образцы были облучены в дозах 0,25, 0,5, 1 и

2 кГр при мощности дозы, создаваемой пучком электронов, $5,9 \pm 1,2$ Гр/с.

Для количественной оценки содержания летучих органических соединений в образцах мясной и рыбной продукции использовали газовый хромато-масс-спектрометр Shimadzu GCMS-QP2010 Ultra (Shimadzu, Япония), снабженный автоматическим устройством ввода паровой фазы HT200H Headspace Autosampler в соответствии с методикой, описанной в работе [21].

Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием Microsoft Excel (США), Origin (Origin Lab Corporation, США) и MATLAB (MathWork Inc, США).

Обсуждение результатов

В облученных и контрольных образцах продукции были идентифицированы летучие соединения трех основных групп: спирты (1), альдегиды (2) и кетоны (3). Их концентрации в образцах продукции, облученных в различных дозах, представлены на рис. 2.

В исследуемых образцах мяса птицы и рыбы обнаружены как общие для двух типов продукции соединения, такие, как спирт изопропанол, альдегиды (гексаналь, пентаналь) и кетоны (ацетон, 2,3-бутандион), так и соединения, идентифицированные только в конкретном типе продукции: в индейке — спирты (гексанол-1, 2,3-бутандиол, 2-этилгексанол), кетоны (3-гидроксибутанон-2, 6-метилпентанон-3); в семге — спирты (пентанол-1, пентен-1-ол-3), альдегиды (гепта-

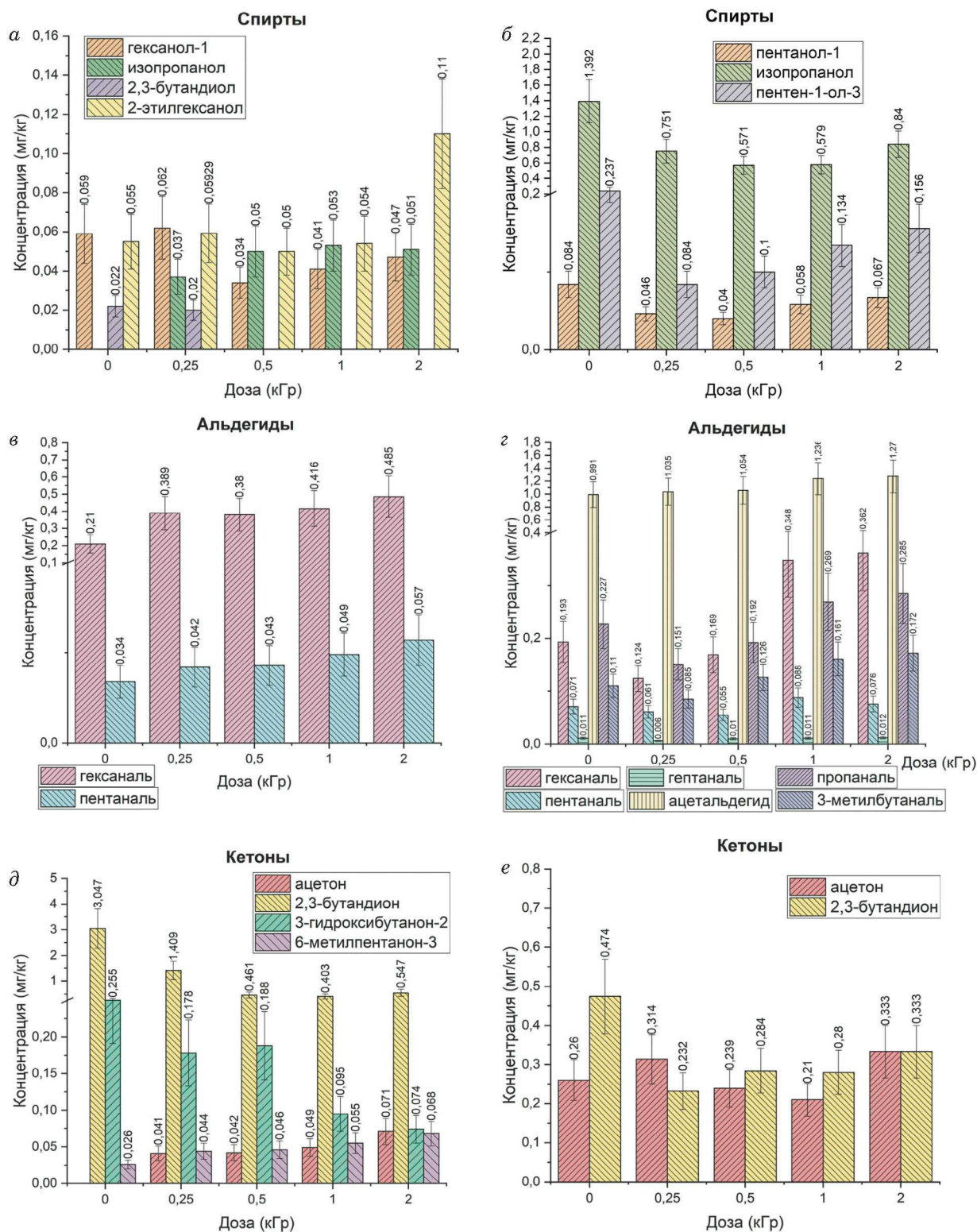


Рис. 2. Гистограммы содержания соединений в образцах индейки (а, в, д) и семги (б, г, е), облученных в различных дозах

Fig. 2. Histograms of the compound content in the samples of turkey (a, c, e) and salmon (b, d, f) irradiated in different doses

наль, ацетальдегид, пропаналь, 3-метилбутаналь) (см. рис. 2).

Выявлена общая тенденция зависимости содержания всех спиртов (пентанол-1, пентен-1-ол-3,

изопропанол) в мясе семги от поглощенной дозы: снижение концентраций более чем в 2 раза при облучении в дозах 0,25 и 0,5 кГр по сравнению с контрольными значениями, а затем плавное

увеличение концентраций с дальнейшим ростом дозы до 2 кГр. При этом можно отметить, что все концентрации спиртов в облученных образцах оказались ниже контрольных значений. В свою очередь, зависимости содержания спиртов (гексанол-1, изопропанол, 2,3-бутандиол, 2-этилгексанол) от дозы облучения в мясе индейки носили различный характер: так, с увеличением дозы концентрация изопропанола нелинейно возрастала, при этом в контрольных образцах данное соединение обнаружено не было. Концентрации других спиртов при облучении в дозе 0,25 кГр имели значения, близкие к контрольным, при дальнейшем увеличении дозы 2,3-бутандиол обнаружен не был, а концентрация гексанола-1 и 2-этилгексанола сначала снижалась, а потом возрастала с увеличением дозы облучения. Можно отметить, что при облучении в дозе 2 кГр концентрация 2-этилгексанола в образцах индейки превысила контрольное значение в 2 раза, в то время как концентрации изопропанола и гексанола-1 не превышали контрольных значений в пределах погрешности измерений.

Концентрации идентифицированных в мясе индейки альдегидов гексанола и пентанола нелинейно возрастали с увеличением дозы облучения, а их максимальные концентрации при обработке в дозе 2 кГр превысили контрольные значения в 2,3 и 1,7 раза соответственно. В мясе семги было обнаружено большее количество альдегидов, вероятно, по причине ее более высокой жирности по сравнению с мясом индейки и более разнообразного жирно-кислотного состава [25 – 30]. При облучении в дозе 0,25 кГр концентрации пропанола, пентанола, гексанола и 3-метилбутанола снижались, а потом нелинейно возрастали с увеличением дозы облучения. Содержание ацетальдегида в образцах семги более чем в 10 раз превышало содержание других идентифицированных альдегидов, при этом его концентрация медленно нарастала от 0,99 до 1,27 мг/кг с увеличением дозы облучения, что характерно для продукции, прошедшей радиационную обработку [31].

Концентрация кетона 2,3-бутандиона нелинейно снижалась с увеличением дозы облучения как для образцов индейки, так и семги. Для ацетона, также обнаруженного в образцах обоих типов, характер зависимостей содержания от поглощенной дозы был различным: в мясе рыбы происходило увеличение концентрации ацетона в 1,5 раза при облучении в дозе 0,25 кГр по сравнению с контрольными показателями, далее снижение концентрации в образцах, облученных в дозе 0,5 кГр, а затем рост содержания данного кетона при дальнейшем увеличении дозы до 2 кГр. В образцах мяса птицы наблюдалось нарастание концентрации ацетона с увеличением дозы облу-

чения при его отсутствии в контрольных образцах. Концентрация остальных идентифицированных кетонов в индейке либо нелинейно возрастала с увеличением дозы облучения (3-гидроксипентанон-2), либо нелинейно уменьшалась (6-метилпентанон-3).

Исходя из поведения идентифицированных соединений и проведенного ранее эксперимента по облучению стандартных образцов органических соединений (спирты гексанол, пентанол; альдегид пентаналь; кетон пентанон) в физиологическом растворе [20] установлено, что во всех исследуемых образцах рыбной и мясной продукции происходят два конкурирующих процесса: распад данных химических соединений и их образование за счет распада других соединений. Исходя из экспериментальных данных, функция, описывающая зависимость изменения концентрации данного соединения в образце продукта от дозы, поглощенной образцом, может быть представлена в следующем виде:

$$C(D) = a \exp(-k_{\text{расп}} D) + b[1 - \exp(-k_{\text{накоп}} D)] + fD, \quad (1)$$

где D (Гр) — доза, поглощенная образцами; a (мг/кг) — начальная концентрация соединения; $k_{\text{расп}}$ (Гр⁻¹) — параметр, характеризующий скорость распада летучего соединения после облучения; b (мг/кг) — параметр, характеризующий максимальную концентрацию летучего соединения в образце вследствие разложения других летучих соединений; $k_{\text{накоп}}$ (Гр⁻¹) — параметр, характеризующий скорость накопления летучего соединения за счет распада других соединений после облучения; f (мг/(л · Гр)) — параметр, характеризующий скорость образования летучего соединения при распаде других видов соединений после облучения.

На основании данных эксперимента по облучению образцов индейки и семги были выделены четыре возможных варианта поведения зависимостей концентраций соединений от дозы облучения. На рис. 3 представлены характерные функции изменения концентраций химического соединения (зеленая кривая) как суммы двух процессов: распад исходного соединения (синяя кривая) и накопление данного соединения за счет распада других соединений (красная кривая) с увеличением дозы облучения.

В первом случае (см. рис. 3, а) скорость образования химического соединения $k_{\text{накоп}}$ превышает скорость его распада $k_{\text{расп}}$ (в данном случае — в два раза) при этом параметры, описывающие концентрацию исходного соединения a и концентрацию соединений, из которых образуется исходное b , также различаются в два раза. Такая зависимость наблюдалась для большинства соединений мяса индейки, таких, как изопропанол,

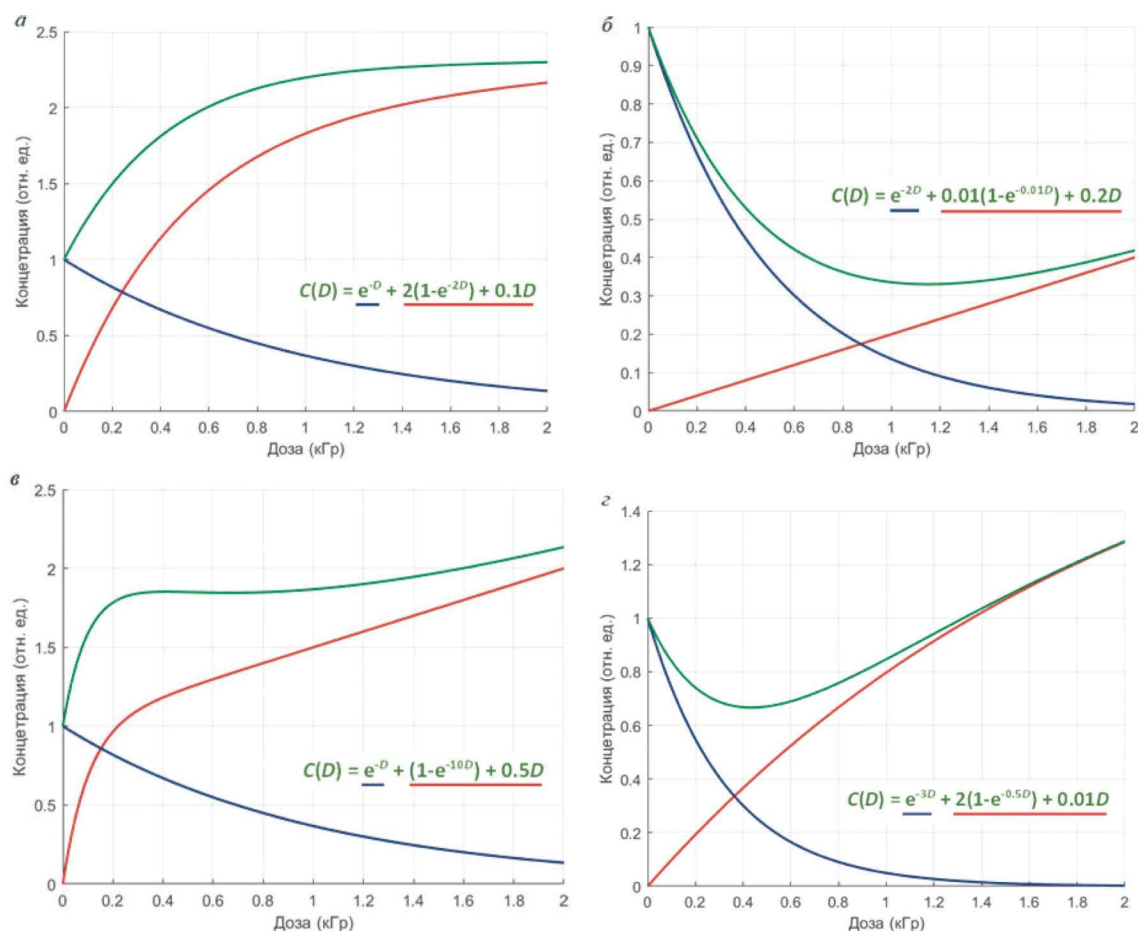


Рис. 3. Модельные зависимости концентраций летучих соединений в образцах продукта как суммы экспериментальных зависимостей концентраций соединений в физиологическом растворе от дозы облучения, рассчитанных по формуле (1)

Fig. 3. Model dependences of the concentrations of volatile compounds in the samples, as the sum of the experimental dependences of the concentrations of compounds in physiological saline on the radiation dose calculated by formula (1)

гексаналь, пентаналь, 6-метилпентанон-3, ацетон.

На рис. 3, б при низких дозах облучения преобладает распад исходного вещества, причем значения коэффициентов $k_{\text{расп}}$ и b отличаются от $k_{\text{накоп}}$ и a более чем на порядок величины, а при увеличении дозы постепенно начинает оказывать влияние процесс образования молекул данного соединения за счет окисления других соединений, отражающийся в параметре f , выходя на насыщение. При этом концентрация соединения при воздействии всех доз облучения не превышает контрольный показатель. Подобная зависимость наблюдалась для всех спиртов (пентанол-1, пентен-1-ол-3, изопропанол), идентифицированных в мясе семги, а также для кетона 2,3-бутандиона в продукции обоих видов.

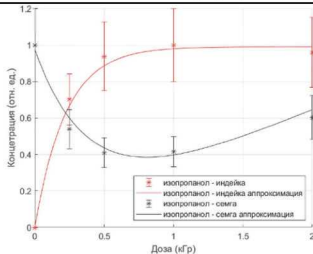
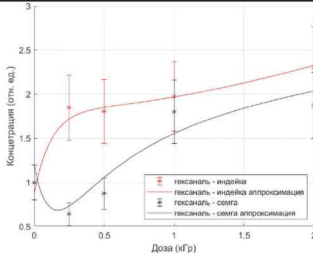
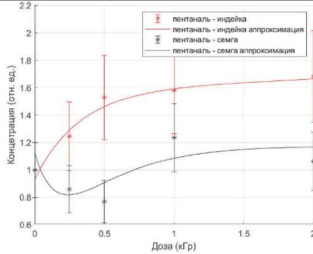
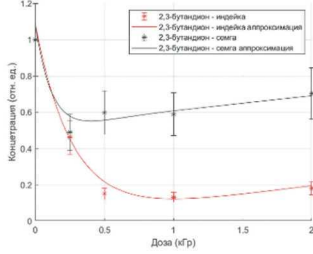
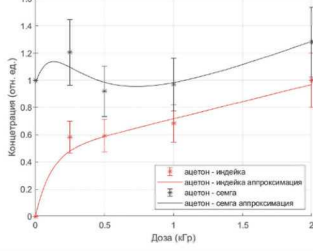
В третьем и четвертом вариантах (см. рис. 3, в, г) при малых дозах облучения процесс накопления соединения $k_{\text{накоп}}$ за счет распада других соединений происходит быстрее (см. рис. 3, в) или медленнее (см. рис. 3, г), чем распад

данного соединения $k_{\text{расп}}$, а при дальнейшем увеличении дозы наблюдается быстрый рост концентрации соединения, превышающей контрольные показатели за счет параметра f в третьем случае (см. рис. 3, в) и за счет коэффициента b (см. рис. 3, г). Зависимость концентрации спирта 2-этилгексанола от дозы облучения в индейке была аналогична третьему варианту, при этом для большинства альдегидов в мясе семги — гексанала, пропанала, гептанала, 3-метилбутанала — наблюдались зависимости, соответствующие четвертому варианту.

В таблице представлены коэффициенты функции (1) для общих идентифицированных соединений в мясе индейки и семги (спирт изопропанол, альдегиды гексаналь и пентаналь, кетоны ацетон и 2,3-бутандион), а также соответствующие коэффициенты корреляции R .

Как видно из таблицы, рассчитанные функции хорошо описывают экспериментальные данные с коэффициентом корреляции 0,96 и выше, что говорит о применимости предложенной моде-

Параметры функции (1), описывающей экспериментальные данные
Parameters of the function (1) describing the experimental data

Аналитические зависимости, рассчитанные по формуле (1)		a , мг/кг	$K_{\text{расп}}$, Гр ⁻¹	b , мг/кг	$k_{\text{накоп}}$, Гр ⁻¹	f , мг/(л · Гр)	R
Изопропанол		Индейка					
		$3,01 \pm 0,06$	$0,77 \pm 0,03$	$0,05 \pm 0,01$	$4,5 \pm 0,4$	$(6,9 \pm 0,4) \times 10^{-9}$	0,99
		Семга					
		$1,36 \pm 0,03$	$2,5 \pm 0,1$	$(2,22 \pm 0,01) \times 10^{-14}$	$(2,2 \pm 0,2) \times 10^{-14}$	$0,45 \pm 0,02$	0,99
Гексаналь		Индейка					
		$0,184 \pm 0,004$	$0,7 \pm 0,1$	$0,21 \pm 0,01$	$8,2 \pm 0,5$	$0,121 \pm 0,002$	0,99
		Семга					
		$0,24 \pm 0,01$	$10,6 \pm 0,9$	$0,41 \pm 0,08$	$1,3 \pm 0,2$	$(4,1 \pm 0,3) \times 10^{-14}$	0,96
Пентаналь		Индейка					
		$0,032 \pm 0,001$	$(2,2 \pm 0,1) \times 10^{-14}$	$0,022 \pm 0,001$	$3,1 \pm 0,1$	$0,002 \pm 0,001$	0,99
		Семга					
		$0,080 \pm 0,003$	$5,8 \pm 0,6$	$0,08 \pm 0,01$	$2,5 \pm 0,4$	$(2,9 \pm 0,3) \times 10^{-14}$	0,96
2,3-Бутандион		Индейка					
		$3,31 \pm 0,03$	$3,7 \pm 0,1$	$(2,22 \pm 0,06) \times 10^{-14}$	$(2,2 \pm 0,1) \times 10^{-14}$	$0,29 \pm 0,02$	0,99
		Семга					
		$0,51 \pm 0,01$	$7,2 \pm 0,5$	$0,25 \pm 0,01$	$5,1 \pm 0,7$	$0,038 \pm 0,003$	0,97
Ацетон		Индейка					
		0	$(2,2 \pm 0,1) \times 10^{-14}$	$0,033 \pm 0,001$	$8,9 \pm 0,6$	$0,018 \pm 0,001$	0,99
		Семга					
		$0,25 \pm 0,01$	$2,7 \pm 0,2$	$0,14 \pm 0,01$	$9,9 \pm 0,8$	$0,09 \pm 0,01$	0,98

ли для описания процессов накопления органических соединений в продуктах после воздействия ионизирующего излучения. При этом видно, что зависимости содержания определенного соединения от дозы облучения в разных образцах продукции могут как различаться, так и иметь сходный характер. Это может быть связано как с различными начальными концентрациями летучих соединений в образцах мясной и рыбной продукции, так и с различным составом и концен-

трацией насыщенных и ненасыщенных жирных кислот и других соединений, которые могут участвовать в образовании летучих веществ [25 – 30]. Известно, что средняя концентрация жира в семге, выращенной на специальной ферме, составляет 6,0 г на 100 г мышечной ткани, а для рыбы, выросшей в диких условиях, — 17,9 г [25]. При этом продукция данного типа отличается богатым жирно-кислотным составом, включающим порядка 30 различных видов насыщенных и не-

насыщенных жирных кислот [25 – 27]. Состав жирных кислот в мясе грудки индейки также достаточно разнообразен в зависимости от чувствительности измеряющих приборов [28], однако содержание жирных кислот и жира в целом меньше по сравнению с семгой и лежит в диапазоне от 0,7 г до 5,5 г на 100 г продукта [29, 30, 32].

Заключение

В ходе проведенных исследований методом ГХ-МС были идентифицированы и определены летучие органические соединения (спирты, альдегиды и кетоны) в охлажденном филе индейки и семги при различных дозах облучения продукции ускоренными электронами с максимальной энергией 1 МэВ.

Все летучие соединения в исследуемых образцах показали нелинейные зависимости концентраций от дозы облучения, при этом для всех альдегидов в мясе индейки и большинства альдегидов в мясе семги наблюдалась общая тенденция — нелинейное увеличение их концентраций с ростом дозы облучения. В свою очередь, для соединений, идентифицированных как в мясе птицы, так и в рыбе — спирта изопропанола, альдегидов гексаналя и гептаноля, кетона ацетона — зависимости концентраций от дозы облучения носили различный характер, что может быть связано с различным жирно-кислотным составом образцов мяса птицы и рыбы, а также с различными начальными концентрациями органических соединений в образцах мясной и рыбной продукции.

На основе анализа экспериментальных данных по содержанию спиртов, альдегидов и кетонов в образцах продукции, облученной в различных дозах, была предложена математическая модель, основанная на предположении об одновременном протекании двух конкурирующих процессов: радиационно-индуцированного распада определяемых соединений и их накопления за счет распада других органических молекул. Была показана применимость и адекватность модели для одних и тех же соединений, обнаруженных в обоих видах продукции.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер НИИЯФ МГУ им. Д. В. Скобелевича В. И. Шведуну и Д. С. Юрову за возможность проведения облучений на ускорителе УЭЛР-1-25-Т-001.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 22-63-00075.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

1. IAEA-TECDOC — 2008. Development of Electron Beam and X-Ray Applications for Food Irradiation. — Vienna: International Atomic Energy Agency, 2022. — 372 p.
2. State of Food and Agriculture 2019. Moving forward on food loss and waste reduction. FAO, 2019. <http://www.fao.org/3/ca6030en/ca6030en.pdf> (accessed October 20, 2022).
3. IAEA-TECDOC — 1786. Radiation Technology for Cleaner Products and Processes: Proceedings of the Technical Meeting on Deployment of Clean (Green) Radiation Technology for Environmental Remediation. — Vienna: International Atomic Energy Agency, 2016. — 246 p.
4. Leyva-Porras C., Román Aguirre M., Cruz-Alcantar P., et al. Application of Antioxidants as an Alternative Improving of Shelf Life in Foods / Polysaccharides. 2021. Vol. 2. P 594 – 607. DOI: 10.3390/polysaccharides2030036
5. Amit S. K., Uddin M. M., Rahman R., et al. A review on mechanisms and commercial aspects of food preservation and processing / Agric. Food Secur. 2017. Vol. 6. Article 51. DOI: 10.1186/s40066-017-0130-8
6. Formanek Z., Lynch A., Galvin K., et al. Combined effect of irradiation and the use of natural antioxidants on the shelf-life stability of overwrapped minced beef / Meat Sci. 2003. Vol. 63. P 433 – 440. DOI: 10.1016/S0309-1740(02)00063-3
7. IAEA-TECDOC — 1337. Radiation Processing for Safe, Shelf-Stable and Ready-to-Eat Food: Proceedings of a final Research Co-ordination Meeting held in Montreal, Canada, 10 – 14 July 2000. — Vienna: International Atomic Energy Agency, 2003. — 264 p.
8. Jayathilaka K., Sultana K., Pandey M. C. Radiation Processing: An Emerging Preservation Technique for Meat and Meat Products / Def. Life Sci. J. 2017. Vol. 2. N 2. P 133 – 141. DOI: 10.14429/dlsj.2.11368
9. Schottroff F., Lasarus T., Stupak M., et al. Decontamination of herbs and spices by gamma irradiation and low-energy electron beam treatments and influence on product characteristics upon storage / J. Radiat. Res. Appl. Sci. 2021. Vol. 14. N 1. P 380 – 395. DOI: 10.1080/16878507.2021.1981112
10. Zaman S., Alam M. K., Mortuza M. F., Bari M. L. Effectiveness of irradiation treatment in eliminating *E. coli* O157:H7 and *Salmonella* in dried organic herb samples intended for use in blended tea / J. Food Nutr. Sci. 2015. Vol. 3. N 1-2. P 165 – 170. DOI: 10.11648/j.fjns.s.2015030102.42
11. Arvanitoyannis I. S., Stratakis A. Ch., Tsarouhas P. Irradiation Applications in Vegetables and Fruits: A Review / Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 2009. Vol. 49. N 5. P 427 – 462. DOI: 10.1080/10408390802067936
12. Bliznyuk U., Chulikova N., Ipatova V., Malyuga A. Effect of ionizing radiation with 1 MeV on phenology of potatoes inhabited by fungi *rhizoctonia solani* kuhn / E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 285. 02001. DOI: 10.1051/e3sconf/202128502001
13. Bliznyuk U. A., Studenikin F. R., Borshchegovskaya P. Yu., et al. Characteristics of dose distributions of electron beams used in the radiation processing of food products / Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2021. Vol. 85. N 10. P 1097 – 1101. DOI: 10.3103/S1068273821100087
14. Qin H., Yang G., Kuang S., et al. Concept development of X-ray mass thickness detection for irradiated items upon electron beam irradiation processing / Radiat. Phys. Chem. 2018. Vol. 143. P 8 – 13. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2017.09.012
15. Arapcheska M., Spasevska H., Ginovska M. Effect of irradiation on food safety and quality / Curr. Trends Natur. Sci. 2020. Vol. 9. N 18. P 100 – 106. DOI: 10.47068/ctns.2020.v9i18.014
16. Li C., He L., Jin G. Effect of different irradiation dose treatment on the lipid oxidation, instrumental color and volatiles of fresh pork and their changes during storage / Meat Sci. 2017. Vol. 128. P 68 – 76. DOI: 10.1016/j.meatsci.2017.02.009
17. Brewer M. S. Irradiation effects on meat flavor: A review / Meat Sci. 2009. Vol. 81. N 1. P 1 – 14. DOI: 10.1016/j.meatsci.2008.07.011

18. **D'Oca M. C., Bartolotta A., Cammilleri M. C., et al.** The gas chromatography/mass spectrometry can be used for dose estimation in irradiated pork / *Radiat. Phys. Chem.* 2009. Vol. 78. N 7 – 8. P. 687 – 689. DOI: 10.1016/J.RADPHYS.2009.03.057
19. **Bliznyuk U., Avdyukhina V., Borshchegovskaya P., et al.** Effect of electron and X-ray irradiation on microbiological and chemical parameters of chilled turkey / *Sci. Rep.* 2022. Vol. 12. P. 750. DOI: 10.1038/s41598-021-04733-3
20. **Bliznyuk U., Borshchegovskaya P., Bolotnik T., et al.** Research into Gas Chromatography — Mass Spectrometry (GC-MS) for Ensuring the Effect of 1 MeV-Accelerated Electrons on Volatile Organic Compounds in Turkey Meat / *Separations*. 2022. Vol. 9. N 8. 227. DOI: 10.3390/separations9080227
21. **Bliznyuk U. A., Avdyukhina V. M., Borshchegovskaya P. Yu., et al.** Determination of chemical and microbiological characteristics of meat products treated by radiation / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2021. Vol. 87. N 6. P. 5 – 13. [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-6-5-13
22. **Chernyaev A. P., Avdyukhina V. M., Bliznyuk U. A., et al.** Study of the effectiveness of treating trout with electron beam and X-ray radiation / *Bul. Russ. Acad. Sci.: Phys.* 2020. Vol. 84. N 4. P. 385 – 390. DOI: 10.3103/S106287382004005X
23. **Chernyaev A. P., Bliznyuk U. A., Borshchegovskaya P. Y., et al.** Using Low-Energy Electrons for the Radiation Treatment of Chilled Trout / *Phys. Part. Nuclei Lett.* 2020. Vol. 17. P. 611 – 614. DOI: 10.1134/S1547477120040160
24. **Bliznyuk U. A., Borshchegovskaya P. Yu., Chernyaev A. P., et al.** Computer simulation to determine food irradiation dose levels / *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2019. Vol. 365. P. 012002. DOI: 10.1088/1755-1315/365/1/012002
25. **Jensen I.-J., Eilertsen K.-E., Otnæs C. H. A., et al.** An Update on the Content of Fatty Acids, Dioxins, PCBs and Heavy Metals in Farmed, Escaped and Wild Atlantic Salmon (*Salmo salar* L.) in Norway / *Foods*. 2020. Vol. 9. N 12. 1901. DOI: 10.3390/foods9121901
26. **Nechev J. T., Edvinsen G. K., Eilertsen K.-E.** Fatty Acid Composition of the Lipids from Atlantic Salmon-Comparison of Two Extraction Methods without Halogenated Solvents / *Foods*. 2021. Vol. 10. N. 1. 73. DOI: 10.3390/foods10010073
27. **Pyz-Łukasik R., Chałabis-Mazurek A., Gondek M.** Basic and functional nutrients in the muscles of fish: a review / *Int. J. Food Prop.* 2020. Vol. 23. N 1. P. 1941 – 1950. DOI: 10.1080/10942912.2020.1828457
28. **Boisteanu P., Ciobanu M., Lazar R.** Researches Regarding the Fatty Acids Content in Turkey Meat / *Bull. UASVM Anim. Sci. Biotechnol.* 2014. Vol. 71. N 2. P. 134 – 137. DOI: 10.15835/buasvmcn-asb:10816
29. **Oblakova M., Ribarski S., Oblakov N., Hristakieva P.** Chemical composition and quality of turkey-broiler meat from crosses of layer light (LL) and meat heavy (MN) turkey / *Trakia J. Sci.* 2016. N 2. P. 142 – 147. DOI: 10.15547/tjs.2016.02.004
30. **Stadnik J., Czech A., Ognik K.** Effect of soybean or linseed oil with RRR-d- α -tocopherol or dl- α -tocopherol acetate on quality characteristics and fatty acid profile of turkey meat / *Ann. Anim. Sci.* 2018. Vol. 18. N 4. P. 991 – 1005. DOI: 10.2478/aoas-2018-0035
31. **Fan X., Thayer D. W.** Formation of Malonaldehyde, Formaldehyde, and Acetaldehyde in Apple Juice Induced by Ionizing Radiation / *J. Food Sci.* 2002. Vol. 67. N 7. P. 2523 – 2528. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2002.tb08770.x
32. **Rymer C., Givens D. I.** n – 3 Fatty Acid Enrichment of Edible Tissue of Poultry: A Review / *Lipids*. 2005. Vol. 40. N 2. P. 121 – 130. DOI: 10.1007/s11745-005-1366-4