

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-3-12-23>

МОНИТОРИНГ КОНЦЕНТРАЦИИ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В МЯСЕ ГОВЯДИНЫ ПОСЛЕ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ УСКОРЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

© **Виктория Сергеевна Ипатова^{1*}, Ульяна Александровна Близнюк^{1,2}, Полина Юрьевна Борщеговская^{1,2}, Тимофей Александрович Болотник³, Александр Денисович Никитченко², Александр Петрович Черняев^{1,2}, Игорь Александрович Родин^{3,4}**

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына, Россия, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2; *e-mail: ipatova.vs15@physics.msu.ru

² Физический факультет Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, 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.

⁴ Первый МГМУ имени И. М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), кафедра эпидемиологии и доказательной медицины, Россия, 119435, Москва, ул. Б. Пироговская, д. 2, стр. 2; e-mail: igorrodin@yandex.ru

*Статья поступила 1 декабря 2023 г. Поступила после доработки 1 декабря 2023 г.
Принята к публикации 25 января 2024 г.*

В пищевых продуктах с высоким содержанием жира и воды, таких как охлажденные мясо и рыба, под действием ионизирующего излучения происходит окисление липидов и белков, что приводит к образованию в продукте летучих органических соединений (ЛОС) и появлению специфических запаха и вкуса. При хранении в обработанных охлажденных продуктах протекают различные биохимические процессы, которые также приводят к изменению содержания ЛОС, влияющих на органолептические показатели продукта. Методом газовой хромато-масс-спектрометрии изучено накопление летучих соединений, идентифицируемых в образцах говядины сразу после радиационной обработки и в течение четырех суток после облучения, в целях определения эффективного диапазона доз радиационной обработки говядины. Мониторинг содержания ЛОС в образцах охлажденного мяса говядины после облучения ускоренными электронами с энергией 1 МэВ в диапазоне доз от 0,25 до 5 кГр выявил явные зависимости концентраций некоторых спиртов, альдегидов и алканов от поглощенной дозы и времени хранения. Предложенная математическая модель, позволяющая описывать зависимости концентраций ЛОС, идентифицированных сразу после облучения в образцах говядины, от дозы облучения, основана на одновременном протекании двух конкурирующих процессов: распада соединений за счет их окисления и накопления за счет окисления других соединений после воздействия ионизирующего излучения. По результатам исследования было установлено, что эффективный диапазон доз радиационной обработки составил от 250 до 1000 Гр.

Ключевые слова: радиационная обработка продуктов питания; говядина; ускоритель электронов; парофазный анализ; газовая хроматография; совмещенная с масс-спектрометрией (ГХ-МС); летучие органические соединения; запах.

MONITORING OF CHANGES IN THE CONCENTRATION OF VOLATILE ORGANIC COMPOUND IN BEEF IRRADIATED WITH ACCELERATED ELECTRONS

© **Victoria S. Ipatova,^{1*} Ulyana A. Bliznyuk,^{1,2} Polina Yu. Borshchegovskaya,^{1,2} Timofey A. Bolotnik,³ Alexander D. Nikitchenko,² Alexander P. Chernyaev,^{1,2} Igor A. Rodin^{3,4}**

¹ Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, Russia, 1-2, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia; *e-mail: ipatova.vs15@physics.msu.ru

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

³ Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University, 1-3, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia.

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; e-mail: igorrodin@yandex.ru

Received December 1, 2023. Revised December 1, 2023. Accepted January 25, 2024.

The need to develop safe methods for radiation processing of food products to improve their quality and extend their shelf life stimulates new scientific research aimed at increasing their effectiveness. Oxidation of lipids and proteins occurred under the impact of ionizing radiation in products with a high fat and water content, such as chilled meat and fish products, leads to the formation of volatile organic compounds in the product thus giving it a specific smell and taste. During storage, biochemical processes associated with microbial enzymatic activity and auto-oxidation develop in processed refrigerated products. These processes also modify the volatile organic compounds, which affect the organoleptic properties of the product. The method of gas chromatography-mass spectrometry was used to study the behavior of volatile compounds identified in irradiated beef samples both immediately after irradiation and four days later to determine the effective dose range for the radiation processing of beef. Monitoring of the content of volatile compounds in beef samples irradiated by 1-MeV electrons within a dose range from 0.25 to 5 kGy showed that the content of certain alcohols, aldehydes, and alkanes exhibited pronounced dose- and time-dependent character. The developed mathematical model describes the dependence of the concentration of volatile compounds identified immediately after irradiation in beef samples on the irradiation dose. The model is based on the simultaneous occurrence of two competing processes: the decomposition of compounds due to their oxidation and accumulation due to oxidation of other compounds after exposure to ionizing radiation. The results obtained revealed that the effective dosage range of radiation treatment lies between 250 and 1000 Gy.

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

Введение

Важными аспектами сохранения качества и безопасности продуктов питания является выбор способа их обработки для увеличения сроков хранения и соблюдение санитарно-эпидемиологических норм на всех этапах производства. Развитие методов радиационной обработки пищевой продукции как альтернативы химическим и термическим методам является одной из актуальных задач промышленной пищевой индустрии, поскольку радиационная обработка не оставляет в продукте остаточной радиоактивности и не вызывает его физико-химических изменений, которые имеют место при температурном воздействии, а также может быть использована для обработки продукции в упаковке, что исключает повторную контаминацию продуктов патогенными микроорганизмами [1 – 4]. Обработку ионизирующим излучением можно проводить в сочетании с другими методами, например, заморозкой [5], а также с использованием антиоксидантов и консервантов [6, 7].

В последнее время растет спрос на обработку охлажденных мясных и рыбных продуктов [8], поскольку данные категории продуктов питания являются благоприятной средой для размножения широкого спектра патогенных и условно-патогенных микроорганизмов [9]. Поиск эффективных параметров радиационной обработки охлажденной говядины требует комплексного подхода вследствие разнообразия микроорганизмов, населяющих мясную продукцию, и высокого содержания жиров и белков, радиационное воздействие на которые может приводить к необратимым физико-химическим изменениям в продукте.

Содержание летучих органических соединений, идентифицируемых в продуктах питания,

зависит от степени физических и химических воздействий, которым подвергаются продукты в процессе производства и при хранении, а также определяется составом питательных веществ продукта [10]. Радиационно-индуцируемые химические превращения биомакромолекул, протекающие в результате окисления липидов и белков, а также разложения углеводов, могут быть выявлены по изменению состава летучих органических соединений (ЛОС) [11]. Вместе с тем ионизирующее излучение позволяет значительно снизить микробиологические показатели продукта, уменьшая при этом возможность образования новых ЛОС за счет уменьшения интенсивности автолиза, гидролиза липидов и фрагментации аминокислот, карбонилирования белков и снижения микробно-ферментативной активности [12].

Метод газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС) широко используется для мониторинга химических изменений пищевой продукции, в том числе, различных мясных продуктов [13, 14]. Спектр возможных идентифицированных ЛОС определяется их концентрацией в продукте, биохимическим составом продукта и чувствительностью прибора [15, 16]. Мониторинг содержания ЛОС методом ГХ-МС может позволить оценить влияние излучения на биохимические и микробно-ферментативные процессы, происходящие в мясной продукции при ее хранении, в целях более глубокого понимания механизма этих процессов и установления эффективного диапазона доз радиационной обработки.

Целью данной работы было изучение влияния ускоренных электронов с максимальной энергией 1 МэВ на концентрацию летучих соединений в мясе говядины в процессе ее хранения в течение четырех дней после облучения для опре-

деления эффективного диапазона значений доз радиационной обработки продукта.

Экспериментальная часть

В качестве объекта исследования было выбрано свежее охлажденное мясо говядины, купленное на рынке. Слайсы мяса говядины (размером $0,8 \times 3$ см и толщиной не более 0,3 см) массой $0,5 \pm 0,1$ г помещали в микроцентрифужные пробирки Эппендорфа (АО «РЗП», Россия) объемом 2 мл. Было подготовлено 100 одинаковых образцов для облучения и последующего анализа. Образцы говядины облучали с использованием линейного ускорителя электронов УЭЛР-1-25-T-001 (НИИЯФ МГУ, Москва, Россия) при максимальной энергии пучка 1 МэВ и среднем токе 0,5 мкА. Образцы выкладывали по 10 штук на дюралюминиевую пластину на расстоянии 12 см от пучка ускорителя. В каждом сеансе облучения фиксировали время, заряд, попавший на дюралюминиевую пластину, и ток пучка. Температура окружающей среды при радиационной обработке составляла 20 °С. Погрешность определения заряда на дюралюминиевой пластине, который измеряли с помощью АЦП (ООО «Производственное объединение ОБЕН», Россия), не превышала 2 %.

Оценку поглощенной дозы проводили с использованием компьютерного моделирования с помощью инструментария Geant4 (ЦЕРН, Швейцария), основанного на методе Монте-Карло [17]. Модель воспроизводила геометрию облучения и все параметры радиационно-технической установки. Количество электронов, запускаемых при моделировании, составляло 10^9 . Подробное описание расчетов дозы, поглощенной образцами, приведено в работе [18]. Образцы были облучены дозами 0,25, 0,5, 1 и 5 кГр при мощности дозы, создаваемой пучком электронов, $10,0 \pm 1,2$ Гр/с.

Из микроцентрифужных пробирок, в которых проводили облучение, по 1 г образцов помещали в стеклянные вials объемом 20 мл (Shimadzu, Япония), которые далее плотно запаивали крышкой. Герметично закрытые вials хранили на протяжении всего эксперимента в холодильнике при температуре 4 °С. Летучие компоненты в облученных и контрольных образцах мяса говядины определяли с использованием газового хроматографа Shimadzu GCMS-QP2010 Ultra (Shimadzu, Япония), снабженного автоматическим устройством ввода паровой фазы HT200H Headspace Autosampler (НТА, Италия). Перед проведением анализа полученные образцы термостатировали в течение 20 мин при 90 °С, далее 1 мл паровой фазы вводили в хроматограф. Компоненты разделяли на капиллярной колонке VF-624 ($60 \text{ м} \times 0,32 \text{ мм} \times 1,8 \text{ мкм}$, Agi-

lent, США). Температурная программа разделения компонентов: начальная температура — 40 °С, далее изотерма в течение 5 мин, затем со скоростью 6 °С/мин подъем до 220 °С, изотерма при конечной температуре 5 мин. В качестве газоносителя служил гелий при постоянной скорости потока через колонку 1,5 мл/мин. Масс-спектрометрический детектор использовали в режиме электронного удара при 70 эВ, температура квадрупольно составляла 200 °С, ионного источника — 230 °С. Хроматограммы регистрировали в режиме сканирования всех ионов для значений m/z от 33 до 350 при скорости сканирования 3,3 скан/с.

Соединения идентифицировали путем сравнения полученных масс-спектров с данными библиотеки масс-спектров NIST/EPA/NIH Mass Spectral Library 2008 (NIST 08) с помощью программного обеспечения GCMSsolution. Содержания компонентов (мг/кг) рассчитывали по градуировочным зависимостям, полученным с использованием стандартных образцов ЛОС. Исследуемые образцы анализировали на содержание ЛОС ежедневно на протяжении четырех дней после облучения. Статистическую обработку полученных данных проводили с помощью Microsoft Excel (США), Origin (Origin Lab Corp., США) и MATLAB (MathWork Inc., США).

Обсуждение результатов

Методом ГХ-МС удалось идентифицировать 27 ЛОС, которые относятся к различным классам — спиртам, альдегидам, кетонам, алканам и серосодержащим соединениям — в зависимости от дозы облучения и срока хранения. В табл. 1 представлены все обнаруженные соединения, их класс, структурная формула, а также описание их запаха на основе экспериментальных данных, полученных другими авторами [19 – 24].

Большинство летучих веществ в мясе говядины после облучения ускоренными электронами также было идентифицировано в других мясных продуктах [25]. Однако в аналогичных работах других авторов [19, 26, 27] были обнаружены соединения и других классов, такие как пиразины, алкены, фураны и фенолы, что может быть связано с различиями в чувствительности используемых аналитических приборов и характеристиках самого исследуемого мяса, в частности, с различным содержанием внутримышечного жира [28] или разными типами корма [29].

Сразу после облучения образцов говядины наблюдались различные тенденции изменения концентраций летучих соединений в зависимости от дозы облучения (рис. 1).

Концентрации альдегидов (2-метилпропаналь, пентаналь, гексаналь, гептаналь, октаналь,

нонаналь), кетонов (2,3-бутандион, ацетон, пентанон-2) и спиртов (этанол, пентанол-1, гексанол-1) резко увеличились в образцах, облученных в дозах 0,25 и 0,5 кГр, далее с увеличением дозы происходил более плавный рост концентрации, а при обработке говядины излучением в дозе 5 кГр концентрация данных соединений превышала контрольные показатели в 1,9 – 7,0 раз. В случае бутанона-2 наблюдался практически линейный рост концентрации с увеличением дозы облучения (см. рис. 1, в). Интересно отметить, что 3-метилбутаналь, являющийся окислительным производным белка, не был обнаружен в контрольных необлученных образцах, но с уве-

личением дозы облучения его концентрация нелинейно возрастала (см. рис. 1, а). Концентрации ацетальдегида (см. рис. 1, а) и серосодержащих соединений (см. рис. 1, з), обладающих крайне неприятным специфическим запахом, в образцах говядины, облученных дозами до 1 кГр, нелинейно снижались из-за вероятного распада данных соединений за счет окислительных процессов, вызванных облучением. При дальнейшем увеличении дозы до 5 кГр концентрация ацетальдегида достигала контрольных показателей (25,0 мг/кг), концентрация диметилсульфида превышала контрольный показатель в два раза, а концентрация метантиола не изменялась и была на уровне дозы 1 кГр (1,96 мг/кг), что

Таблица 1. Летучие органические соединения, идентифицированные в мясе говядины после ее обработки ускоренными электронами

Класс	Соединение	Формула	Описание запаха
Альдегиды	Ацетальдегид	$\text{CH}_3\text{-CHO}$	Запах гнилых яблок
	2-Метилпропаналь	$\text{CH}_3\text{-CH}(\text{CH}_3)\text{-CHO}$	Ореховый, солодовый, горелый, резкий
	3-Метилбутаналь	$\text{CH}_3\text{-CH}(\text{CH}_3)\text{-CH}_2\text{-CHO}$	Мясной, жирный, тухлый
	Пентаналь	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CHO}$ или $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}$	Фруктовый, ореховый, резкий
	Гексаналь	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$	Рыбный, жирный, травянистый
	Гептаналь	$\text{C}_7\text{H}_{14}\text{O}$	Фруктовый, свежий, маслянистый, ореховый, жирный, горелый
	Октаналь	$\text{C}_8\text{H}_{16}\text{O}$	Травянистый, цитрусовый
	Нонаналь	$\text{C}_9\text{H}_{18}\text{O}$	Свежий, цитрусовый, восковой, жирный
Спирты	Этанол	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$	Жареный (слабый), запах, похожий на ацетальдегид
	2-Метилпропанол-1	$(\text{CH}_3)_2\text{-CH-CH}_2\text{-OH}$	Маслянистый
	3-Метилбутанол-1	$(\text{CH}_3)_2\text{-CH-CH}_2\text{-CH}_2\text{-OH}$	Горелый
	2-Метилбутанол-1	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}(\text{CH}_3)\text{-CH}_2\text{-OH}$	Грибной, фруктовый
	Пентанол-1	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-OH}$	Маслянистый, фруктовый, бальзамический
	Гексанол-1	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-OH}$	Древесный, травянистый, фруктовый, маслянистый, жирный
	1-Октен-3-ол	$\text{CH}_2=\text{CH-CH}(\text{OH})\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_3$	Грибной, травянистый, землистый, маслянистый, жирный
	2-Этилгексанол-1	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}(\text{C}_2\text{H}_5)\text{-CH}_2\text{-OH}$	Цветочный, травянистый, смолянистый
Кетоны	Ацетон	$\text{CH}_3\text{-C}(\text{O})\text{-CH}_3$	Сливочный, маслянистый, жирный
	2,3-Бутандион	$\text{CH}_3\text{-C}(\text{O})\text{-C}(\text{O})\text{-CH}_3$	Карамельный, маслянистый
	Бутанон-2	$\text{CH}_3\text{-C}(\text{O})\text{-CH}_2\text{-CH}_3$	Фруктовый, запах жженого шоколада
	Пентанон-2	$\text{CH}_3\text{-C}(\text{O})\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_3$	—
	3-Гидроксибутанон-2	$\text{CH}_3\text{-C}(\text{O})\text{-C}(\text{OH})\text{-CH}_3$	Сливочный
	4-Гидроксибутанон-2	$\text{CH}_3\text{-C}(\text{O})\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-OH}$	—
Сульфиды	Диметилсульфид	$\text{CH}_3\text{-S-CH}_3$	Сернистый запах, запах лука, капусты
Тиолы	Метантиол	$\text{CH}_3\text{-S-H}$	Запах жареного картофеля, пикантный
Углеводороды (<i>n</i> -алканы)	<i>n</i> -Гексан	C_6H_{14}	Специфический запах (слабый)
	<i>n</i> -Гептан	C_7H_{16}	Цветочный, фруктовый
	<i>n</i> -Октан	C_8H_{18}	Фруктовый, жирный

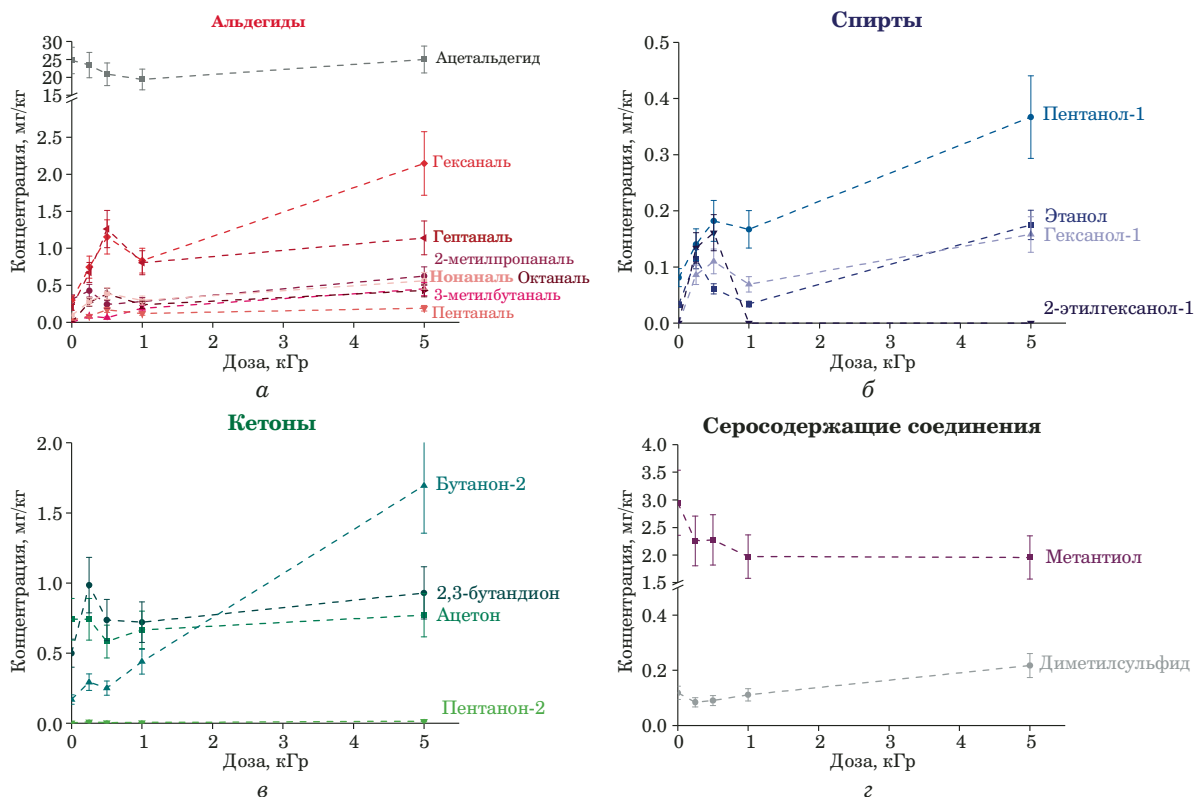


Рис. 1. Зависимость концентраций альдегидов (а), спиртов (б), кетонов (в) и серосодержащих соединений (г) в облученных образцах говядины сразу после облучения

Fig. 1. Dependence of the concentrations of aldehydes (a), alcohols (b), ketones (c) and sulfur-containing compounds (d) in irradiated beef samples immediately after irradiation

в 1,5 раза ниже по сравнению с контрольным значением.

Следует также отметить, что в целом для большинства летучих соединений облучение дозой 1 кГр не приводило к сильному изменению их концентраций, при этом для метантиола, который является наиболее неприятно пахнущим соединением в мясе говядины, облучение дозой 1 кГр привело к снижению концентрации. При дальнейшем увеличении дозы до 5 кГр наблюдался рост концентраций большинства соединений по сравнению с контрольными показателями, что согласуется с работами других авторов [30, 31].

Установлено, что зависимость концентрации летучих соединений от поглощенной дозы носит нелинейный характер, что, как показывает разработанная авторами математическая модель, может быть результатом двух конкурирующих процессов — распада соединения и его накопления после облучения в результате распада других ЛОС и биомолекул, таких как жирные кислоты, белки и углеводы. Согласно модели, опубликованной в работе [32], функция, описывающая зависимость изменения концентрации ЛОС в образце продукта от дозы, поглощенной образ-

цом, может быть представлена в следующем виде:

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

где D — доза, поглощенная образцами, Гр; a — начальная концентрация ЛОС, мг/кг; $k_{\text{расп}}$ — параметр, характеризующий скорость распада ЛОС после облучения, Гр⁻¹; b — параметр, характеризующий максимальную концентрацию ЛОС в образце вследствие разложения других соединений, мг/кг; $k_{\text{накоп}}$ — параметр, характеризующий скорость накопления ЛОС за счет распада после облучения соединения, являющегося основным источником образования данного ЛОС; $f(D)$ — функция, характеризующая накопление ЛОС за счет разложения других соединений другими способами. Предполагая, что в диапазоне доз от 0,25 до 10 кГр функция $f(D)$ линейно зависит от дозы D , запишем, что $f(D) = gD$, где g — коэффициент пропорциональности, Гр⁻¹.

В табл. 2 представлены параметры аппроксимации для всех идентифицированных соединений в облученном мясе говядины, рассчитанные по формуле (1). Высокие значения коэффициентов корреляции R и низкая стандартная ошибка

Таблица 2. Параметры функции (1) для разных летучих органических соединений в облученном мясе говядины**Table 2.** Parameters of function (1) for various volatile organic compounds in irradiated beef

Соединение	$k_{расп}, \text{кГр}^{-1}$	$k_{накоп}, \text{кГр}^{-1}$	$a, \text{мг/кг}$	$b, \text{мг/кг}$	$g, \text{кГр}^{-1}$	R	SE
Ацетальдегид	0,53	0,00	24,9	0,00	4,66	0,99	0,54
2-Метилпропаналь	3,9	20,0	0,32	0,24	0,02	0,86	0,004
3-Метилбутаналь	3,4	0,41	0,005	0,51	0,00	0,99	0,002
Пентаналь	1,2	4,54	0,03	0,12	0,01	0,92	0,002
Гексаналь	1,4	7,0	0,32	0,63	0,30	0,98	0,09
Гептаналь	72,3	6,2	0,20	0,99	0,03	0,89	0,15
Октаналь	101	11,49	0,00	0,29	0,03	0,94	0,013
Нонаналь	82,0	1,9	0,09	0,36	0,04	0,88	0,05
Этанол	2,2	20,0	0,05	0,06	0,00	0,84	0,002
Пентанол-1	1,3	5,4	0,08	0,10	0,05	0,99	0,004
Гексанол-1	1,7	19,9	0,01	0,08	0,02	0,96	0,0
2-Этилгексанол-1	1,3	6,1	0,00	0,03	0,02	0,73	0,012
Ацетон	1,6	0,99	0,76	0,78	0,00	0,80	0,008
2,3-Бутандион	6,7	13,0	0,50	0,72	0,00	1,00	0,000
Бутанон-2	3,5	20,1	0,18	0,11	0,32	0,99	0,003
Пентанон-2	2,50	20,0	0,00	0,00	0,00	0,91	0,0
Диметилсульфид	5,4	3,0	0,12	0,09	0,03	1,00	0,0
Метантиол	0,61	0,00	2,80	0,00	0,37	0,93	0,09

SE показывают адекватность предложенной математической модели.

Следует отметить, что модель не учитывает все возможные способы, которыми каждое соединение может с разной вероятностью образовываться и разлагаться, однако позволяет с высокой точностью оценить преимущественное влияние распада или накопления идентифицированного соединения в зависимости от дозы облучения.

На рис. 2 представлены радары суммарных концентраций соединений разных классов, определенных сразу после облучения (см. рис. 2, а) и в течение четырех дней хранения (см. рис. 2, б – д) в контрольных необлученных образцах говядины и в образцах, облученных дозой 5 кГр. Приведенная ниже диаграмма иллюстрирует кинетику изменения содержания летучих соединений с течением времени: красный цвет соответствует ЛОС в необлученных образцах говядины, а серый — ЛОС в облученных образцах (5 кГр).

Кинетика изменения суммарных содержаний летучих соединений как в контрольных образцах говядины, так и в облученных дозой 5 кГр была различной. Концентрация альдегидов на нулевые сутки в контрольных и облученных образцах была наибольшей по сравнению с другими классами соединений и составила 25,7 и 30,6 мг/кг соответственно. При дальнейшем хранении контрольных необлученных образцов говядины концентрация альдегидов нелинейно снижалась и

уже на четвертые сутки хранения составляла 0,9 мг/кг, при этом для облученных образцов в первые двое суток концентрация оставалась почти неизменной, а начиная с третьих суток также начинала снижаться до значения 3,7 мг/кг к четвертым суткам хранения.

Концентрация спиртов как в контрольных, так и в облученных образцах увеличивалась при хранении говядины, причем во всех облученных образцах в течение первых трех суток — наиболее интенсивно (в среднем от 0,7 до 8,1 мг/кг). На четвертые сутки хранения концентрация спиртов в необлученных образцах превысила показания для облученных образцов и составила 12,5 мг/кг, в то время как в образцах, облученных дозой 5 кГр, ее значение составило 9,4 мг/кг.

Суммарная концентрация кетонов в образцах, облученных дозой 5 кГр, выше по сравнению с контрольными показателями во все дни мониторинга, однако пиковое значение было достигнуто в разные дни: в контрольных образцах — на вторые сутки хранения (37,6 мг/кг), после чего наблюдался спад до контрольных значений (1,1 – 1,9 мг/кг), а в облученных — на третьи сутки (38,6 мг/кг).

Сразу после облучения в контрольных и облученных образцах говядины отсутствовали алканы, однако с течением времени хранения их концентрация постепенно увеличивалась: для контрольных образцов, начиная со вторых суток, — от 0,16 до 0,56 мг/кг к четвертым суткам хране-

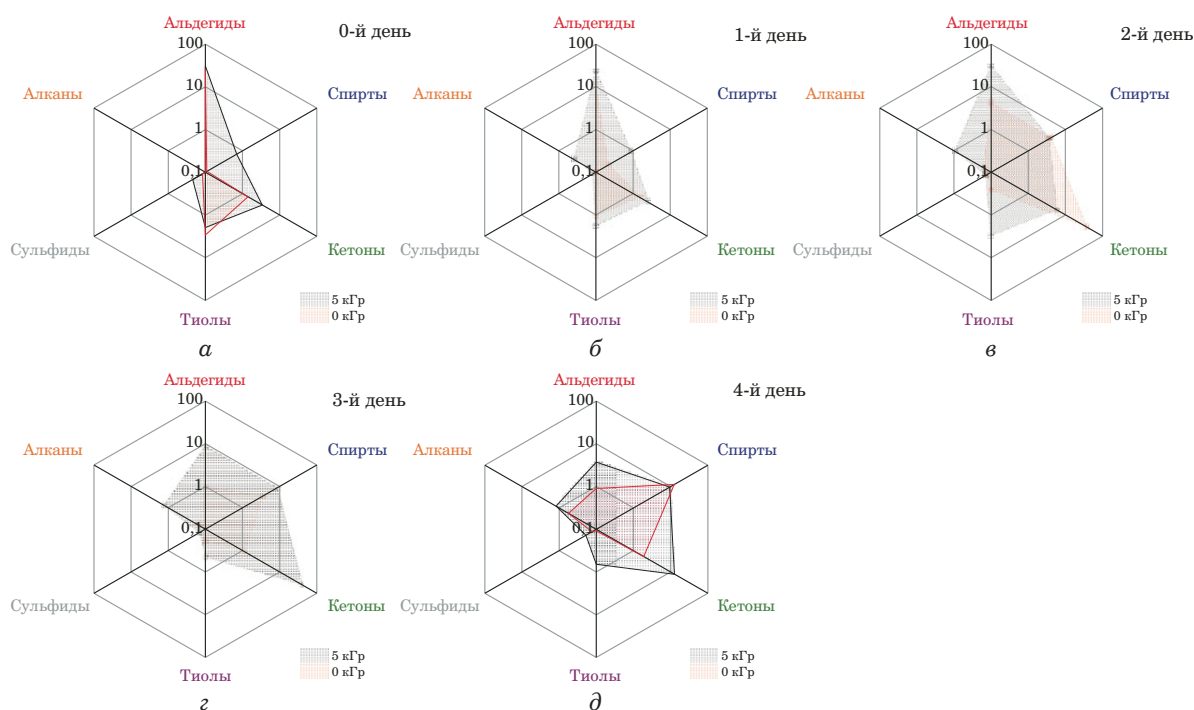


Рис. 2. Летучие соединения, обнаруженные в необлученных образцах говядины (красная кривая) и в облученных дозой 5 кГр (серая кривая), по результатам анализа на 0-й (а), 1-й (б), 2-й (в), 3-й (г) и 4-й день хранения (д)

Fig. 2. Volatile compounds detected in non-irradiated (red curve) and irradiated beef samples with 5 kGy (gray curve), measured immediately after irradiation 0 (a), and on the first (b), second (c), third (d), and fourth (e) day of storage

ния, а для облученных дозой 5 кГр с первых суток до конца мониторинга — от 0,38 до 1,2 мг/кг.

Два серосодержащих соединения, которые были идентифицированы в нулевой день во всех образцах говядины, также можно было обнаружить в течение всех четырех дней хранения. При этом концентрация диметилсульфида оставалась практически неизменной на протяжении всего мониторинга как в контрольных образцах (0,05 – 0,13 мг/кг), так и в облученных дозой 5 кГр (0,12 – 0,22 мг/кг), а концентрация метантиола в контрольных образцах снижалась от 2,95 до 0,11 мг/кг на протяжении всего времени наблюдения, в то время как в образцах, облученных дозой 5 кГр, его концентрация увеличивалась на вторые сутки хранения.

Результаты экспериментов показывают, что для соединений внутри каждого отдельного класса зависимости концентраций от времени хранения и дозы облучения имеют сходный характер, поэтому для удобства при дальнейшем обсуждении мы будем учитывать механизмы, специфичные для каждого отдельного класса. Рисунок 3 иллюстрирует кинетику изменения концентраций летучих соединений различных классов, таких как альдегиды, спирты, кетоны, алканы и серосодержащие соединения, в облученных и контрольных образцах говядины при хранении в течение четырех суток.

Альдегиды. Альдегиды представляют собой большую группу летучих органических соединений, во многом определяющих специфический запах мясной продукции [33, 34]. Несмотря на то, что концентрация ацетальдегида, образующегося в результате разложения различных жирных кислот и спиртов, присутствующих в мясе [35], в облученных и необлученных образцах снижалась в процессе хранения (см. рис. 3, а), это соединение является преобладающим идентифицированным альдегидом в говядине при всех дозах облучения в разное время хранения. Нелинейное снижение концентрации ацетальдегида в облученных и необлученных образцах говядины с течением времени можно объяснить его распадом из-за высокой реакционной способности и высокой скоростью окисления в присутствии кислорода. Концентрация ацетальдегида нелинейно зависела от дозы облучения на протяжении всего периода наблюдения. Следует также отметить, что концентрация ацетальдегида резко уменьшалась на третий и четвертый дни после облучения после постепенного снижения в течение первых двух дней хранения.

Согласно исследованиям [27, 36] основной вклад в специфический запах мясных продуктов после облучения вносят продукты деградации ненасыщенных жирных кислот, а именно, альдегиды с прямой цепью, такие как пентаналь, гексаналь, гептаналь, октаналь, нонаналь. Для всех

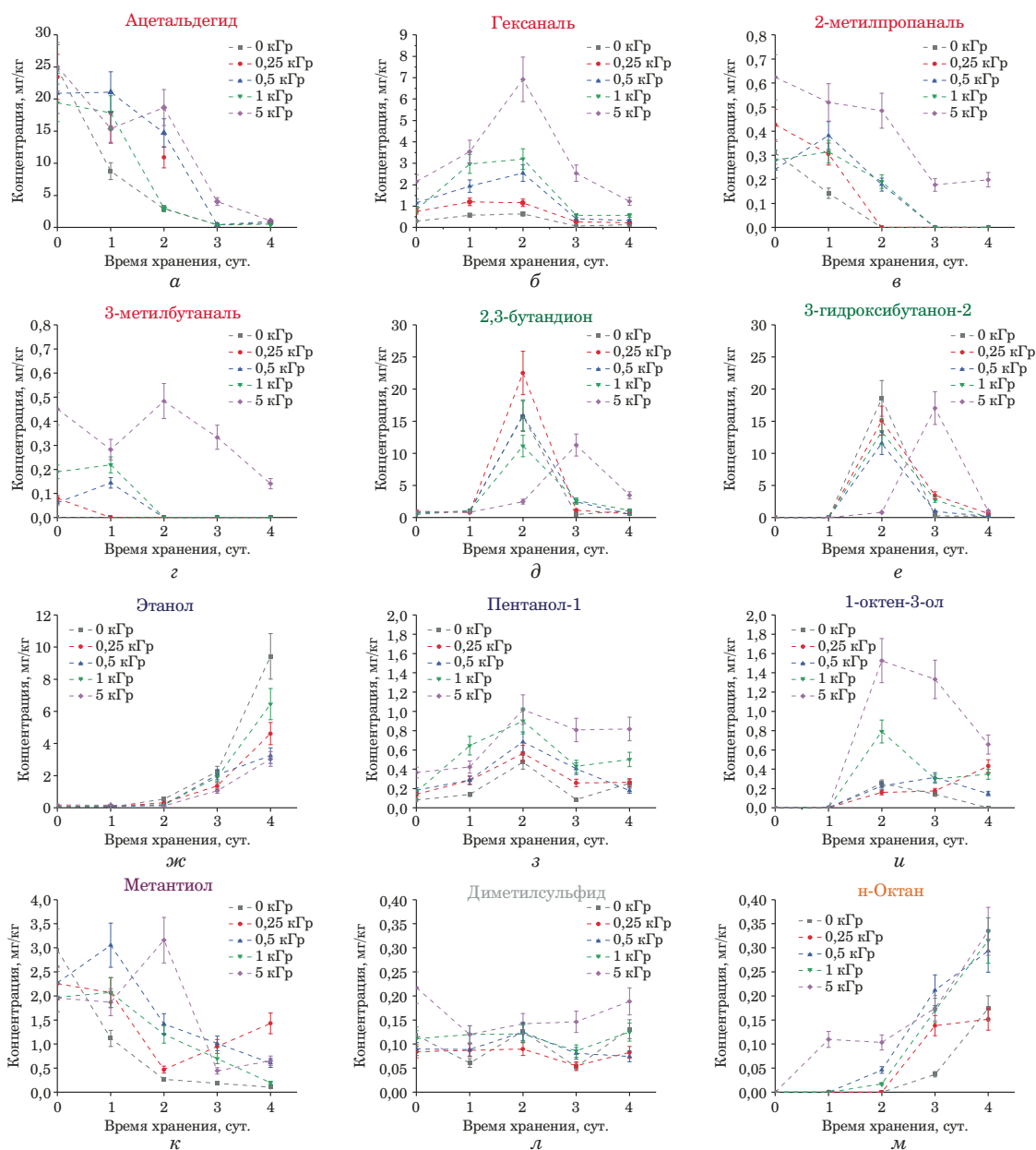


Рис. 3. Зависимость концентрации альдегидов [ацетальдегида (а), гексаналя (б), 2-метилпропаналя (в), 3-метилбутаналь (г)], кетонов [2,3-бутандиона (д), 3-гидроксибутанона-2 (е)], спиртов [этанол (ж), пентанола-1 (з), 1-октен-3-ола (и)], серосодержащих соединений [метантиола (к), диметилсульфида (л)], алканов [n-октана (м)] в образцах мяса говядины, облученных дозами 0,25 – 10 кГр, от времени хранения

Fig. 3. Dependence of the concentration of aldehydes [acetaldehyde (a), hexanal (b), 2-methylpropanal (c), 3-methylbutanal (d)], ketones [2,3-butanedione (e), 2-butanone, 3-hydroxy (f)], alcohols [ethanol (g), 1-pentanol (h), 1-octen-3-ol (i)], sulfur-containing compounds [methanethiol (j), dimethyl sulfide (k)]; alkanes [n-octane (l)] in beef irradiated at doses of 0.25 – 10 kGy on the storage time

идентифицированных альдегидов, являющихся продуктами окисления липидов [37], характер зависимости концентрации от дозы и времени хранения был сходным: увеличение концентрации в первый и второй дни после облучения с последующим резким снижением в течение оставшегося периода наблюдения (см. рис. 3, б). Установлено явное влияние поглощенной дозы: чем она выше, тем больше значение максимума концентрации альдегидов в исследуемых образцах. Кро-

ме того, с увеличением дозы пик химического выхода прямоцепочечных альдегидов по временной шкале смещался в сторону большего времени наблюдения. Следует отметить, что максимальный и наиболее продолжительный эффект накопления альдегидов, образующихся при окислении липидов, наблюдался в образцах говядины, облученных дозой 5 кГр.

2-Метилпропаналь и 3-метилбутаналь — продукты окисления белковых молекул в облучен-

ных образцах говядины [29, 38] — показали совершенно другую зависимость содержания от времени хранения по сравнению с альдегидами — продуктами окисления липидов. В первые двое суток после облучения в зависимости от поглощенной дозы после незначительного роста концентрация разветвленных альдегидов в течение последующих четырех суток наблюдения постепенно снижалась (см. рис. 3, в, з).

Концентрация 2-метилпропаналя, образующегося как при окислении спирта пропанола-2, так и аминокислот изолейцина и валина [19], нелинейно уменьшалась со временем (см. рис. 3, в). Данное соединение, как отмечается в работе [39], сильно влияет как на аромат мяса, так и на его вкус. Хотя 2-метилпропаналь изначально присутствовал как в необлученных, так и во всех облученных образцах говядины, его концентрация снижалась со скоростью, зависящей от поглощенной дозы: чем выше доза, тем больше времени требовалось для уменьшения количества 2-метилпропаналя. Для контрольных и облученных дозой 0,25 кГр образцов говядины данное соединение не было обнаружено, начиная со вторых суток хранения, для доз облучения 0,5 и 1 кГр — начиная с третьих суток. При этом концентрация 2-метилпропаналя в образцах, облученных дозой 5 кГр, достигала максимума сразу после облучения, а в течение четырех суток хранения она снижалась.

3-Метилбутаналь, имеющий неприятный, но слабый запах, является продуктом окисления изолейцина [29, 38]. В нашем исследовании этот альдегид не был обнаружен в контрольных образцах на протяжении всего периода исследований, что согласуется с данными аналогичных экспериментов с образцами мяса говядины [19, 40]. В образцах говядины, облученных дозой 0,25 кГр, 3-метилбутаналь обнаружен только сразу после облучения в концентрации 0,08 мг/кг, а при дальнейшем хранении он не был идентифицирован (см. рис. 3, з). Для образцов, облученных дозами 0,5 и 1 кГр, концентрация 3-метилбутаналя изменялась от 0,06 до 0,2 мг/кг, ее максимальное значение наблюдалось на первые сутки после облучения, а при дальнейшем хранении данное соединение также обнаружено не было. Концентрация 3-метилбутаналя в образцах, облученных дозой 5 кГр, была максимальной на второй день мониторинга, а после четырех суток хранения этот альдегид все еще присутствовал в образце, хотя в течение оставшихся двух дней мониторинга его концентрация снижалась (см. рис. 3, з).

Следует отметить, что если в образцах говядины, облученных дозами от 0,25 до 1 кГр, альдегиды-продукты окисления белков были обнаружены только в течение двух первых суток после облучения, то в образцах говядины, облученных

дозой 5 кГр, они были идентифицированы на протяжении всех четырех суток наблюдения.

Кетоны. Основной вклад в суммарное содержание кетонов после облучения образцов различными дозами при хранении в течение пяти дней внесли 3-гидроксипропанон-2 и 2,3-бутандион (см. рис. 3, д, е). При этом оба соединения являются интенсивными одорантами мясной продукции, придающими ей специфический маслянистый запах [23, 41]. Концентрация данных кетонов, обнаруженных в образцах говядины, резко возрастала на второй день после облучения в диапазоне доз до 1 кГр, а затем снижалась до контрольных значений. При этом оказалось, что чем выше поглощенная доза, тем меньше значение максимума концентрации кетона. В образцах, облученных дозой 5 кГр, концентрация 3-гидроксипропанола-2 и 2,3-бутандиона достигала максимума позже (на третий день после облучения). По литературным данным [42] 3-гидроксипропанон-2 и 2,3-бутандион накапливаются в мясных продуктах в результате окисления спирта 2,3-бутандиола, являющегося продуктом распада жирных кислот, а также при разложении дикарбонила и гидроксилкарбонила или автолизе полисахарида гликогена, присутствующего в мышечной ткани продукции животного происхождения [43]. Поскольку ни в одной из проб говядины за весь период хранения 2,3-бутандиол не был обнаружен, то, вероятно, на накопление данных кетонов оказал влияние автолиз гликогена в присутствии гидролитических ферментов.

Спирты. Концентрация спиртов во всех необлученных и облученных образцах говядины нелинейно зависела как от дозы облучения, так и от времени хранения (см. рис. 3, ж – и). Из литературных источников [19, 44] известно, что спирты с прямой цепью или первичные спирты, такие, как пентанол-1 и гексанол-1, образуются в результате окисления ненасыщенных жирных кислот подобно альдегидам с прямой цепью, в то время как спирты с разветвленной цепью — бутанол-1, 3-метилбутанол-1, 2-метилпропанол-1, 1-октен-3-ол и 2-этилгексанол-1 — могут накапливаться в результате разложения белков вследствие активности бактерий или других биохимических процессов, протекающих в мясе при хранении.

Основной вклад в общую концентрацию спиртов внес этанол (см. рис. 3, ж), который является продуктом иницируемого микробными ферментативными превращениями гидролиза гликогена [45]. Сразу после облучения и в первый день хранения концентрация этанола была незначительной для всех образцов говядины (0,03 – 0,18 мг/кг), на второй день ее значения резко возрастали и продолжали расти в течение следующих двух дней мониторинга, что является

показателем увеличения бактериальной активности. В образцах говядины, облученных дозами от 0,25 до 5 кГр, скорость повышения концентрации этанола была ниже контрольных показателей, что может служить признаком инактивации микроорганизмов при облучении. Следовательно, чем выше доза облучения, тем ниже концентрация микроорганизмов в говядине и тем ниже концентрация этанола.

Зависимость концентрации прямоцепочечных спиртов (пентанола-1 и гексанола-1) от времени хранения в необлученных и облученных образцах говядины является нелинейной (см. рис. 3, з). Во всех образцах концентрация пентанола-1 достигала максимума на вторые сутки хранения. При этом концентрация пентанола-1 увеличивается с ростом поглощенной дозы, что является признаком преимущественного накопления спиртов за счет окисления жирных кислот активными формами кислорода, концентрация которых возрастает с увеличением дозы облучения [34, 46].

Несмотря на низкую концентрацию 1-октен-3-ол (0,1 – 1,5 мг/кг) со специфическим грибным привкусом является ключевым вкусовым компонентом говяжьего мяса [27]. Данное соединение — продукт разложения линолевой кислоты или восстановления карбонильных соединений [47]. В данном исследовании 1-октен-3-ол не был обнаружен в контрольных и облученных образцах на протяжении первых суток мониторинга (см. рис. 3, и). Начиная со вторых суток наблюдения, концентрация данного спирта в контрольных образцах и образцах, облученных дозами 0,25 – 0,5 кГр, практически не менялась, оставаясь на уровне 0,1 – 0,4 мг/кг. При обработке говядины дозами 1 и 5 кГр наблюдалось увеличение концентрации на вторые-третьи сутки хранения в три и шесть раз по сравнению с контрольными показателями соответственно, а при дальнейшем мониторинге зафиксировано уменьшение концентрации 1-октен-3-ола. Для остальных спиртов с разветвленной цепью наблюдался нелинейный рост концентраций со временем во всем диапазоне доз облучения, что может быть признаком окисления белковых молекул, инициируемого как бактериальной ферментативной активностью, так и активными формами кислорода, присутствующими в контрольных и облученных образцах говядины на протяжении всего периода наблюдения.

Серосодержащие соединения. Серосодержащие соединения метантиол и диметилсульфид, обнаруженные в образцах говядины, образуются в результате разложения серосодержащих белковых аминокислот, таких как метионин, цистеин и цистин [48, 49]. Концентрация метантиола, имеющего неприятный гнилостный запах [27], в

контрольных образцах нелинейно снижалась от 3,0 до 0,1 мг/кг (см. рис. 3, к), что свидетельствует о постепенном разложении данного соединения. Во всех облученных образцах говядины его концентрация нелинейно зависела от дозы облучения, что говорит о протекании конкурирующих процессов накопления, вызванного окислением белков, и разложения метантиола при его окислении активными формами кислорода.

Диметилсульфид, обнаруженный во всех контрольных и облученных образцах говядины, присутствовал в низких концентрациях (не более 0,2 мг/кг) на протяжении всего периода хранения (см. рис. 3, л). Даже низкое содержание диметилсульфида, часто идентифицируемого в мясной продукции, придает ей запах «тухлой капусты» [40, 50]. Следует отметить, что концентрации этого соединения в образцах говядины, облученных дозами от 0,25 до 1 кГр, близки к контрольным значениям на протяжении всего времени наблюдения. В образцах, облученных дозой 5 кГр, в течение всего периода наблюдения наблюдалось увеличение концентрации диметилсульфида в 2,8 раза по сравнению с контрольными показателями.

Алканы. Концентрация *n*-алканов — *n*-гептана, *n*-гексана и *n*-октана, представляющих собой насыщенные углеводороды, которые образуются в результате соединения двух органических радикалов, нелинейно возрастала в облученных образцах говядины с увеличением времени хранения (см. рис. 3, м). Данные соединения не были обнаружены в контрольных и облученных образцах говядины сразу после облучения, однако при дальнейшем хранении наблюдался рост их концентрации, коррелирующий с дозой облучения: чем выше доза, тем больше концентрация алканов в мясе говядины, что может свидетельствовать о глубоких окислительных реакциях макромолекул, вызванных излучением.

Заключение

В ходе проведенного исследования методом газовой хромато-масс-спектрометрии идентифицированы и определены летучие органические соединения разных классов, присутствующие в мясе говядины после облучения ускоренными электронами с максимальной энергией 1 МэВ при хранении в течение четырех суток после облучения. Установлено, что скорость превращения ЛОС, а также их химический выход нелинейно зависят от дозы облучения.

Все летучие соединения в исследуемых образцах показали нелинейные зависимости концентраций от дозы облучения сразу после проведения радиационной обработки, которые могут быть описаны предложенной авторами мате-

матической моделью, основанной на одновременном протекании двух конкурирующих процессов — разложения летучего соединения за счет прямого и косвенного действия излучения и его накопления за счет разложения других соединений и биомакромолекул. Предложенная модель позволяет оценить параметры превращений летучих соединений в зависимости от дозы облучения.

Установлено, что альдегиды, являющиеся продуктами окисления жирных кислот, интенсивно накапливаются в течение первых трех суток хранения говядины, причем чем выше доза облучения, тем больше содержание данных соединений и тем позже оно достигает максимального значения. Выявлены зависимости концентрации алканов как индикаторов глубокого окисления биомакромолекул (липидов) от дозы облучения на третьи и четвертые сутки хранения образцов говядины, однако химический выход алканов был в среднем в 10 раз ниже по сравнению с альдегидами, которые являются индикаторами первичного окисления белковых и липидных макромолекул. Анализ изменения концентрации этанола от времени показал, что химический выход и абсолютное содержание этанола были тем выше, чем меньше доза облучения, поэтому этанол может быть использован как индикатор микробно-ферментативных процессов, протекающих в говядине при хранении.

Таким образом, соединения, идентифицируемые в говядине при ее хранении после облучения ускоренными электронами, могут служить индикаторами окислительных процессов тех или иных биомакромолекул, а также ферментативных процессов, запускаемых биологической микрофлорой. На основании характера накопления определенных летучих соединений можно установить эффективный диапазон доз для облучения охлажденной мясной продукции: нижний предел диапазона может быть определен по концентрации этанола, связанного с бактериальной активностью, а верхний — по концентрации альдегидов, образующихся в результате окисления липидов и белков. В условиях данного эксперимента по облучению говядины ускоренными электронами эффективный диапазон доз составил от 0,25 до 1 кГр.

Финансирование

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

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер НИИЯФ МГУ им.

Д. В. Скобельцына В. И. Шведуну и Д. С. Юрову за возможность проведения облучения на ускорителе УЭЛР-1-25-Т-001.

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.foa.org/3/ca6030en/ca6030en.pdf> (accessed December 1, 2023).
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. European Food Safety Authority. Statement Summarizing the Conclusions and Recommendations from the Opinions on the Safety of Irradiation of Food adopted by the BIOHAZ and CEF Panels / EFSA J. 2011. Vol. 9. N 4. 2107. DOI: 10.2903/j.efso.2011.2107
5. Sales L., Rodrigues L., Silva D., et al. Effect of freezing/irradiation/thawing processes and subsequent aging on tenderness, color, and oxidative properties of beef / Meat Sci. 2020. Vol. 163. 10878. DOI: 10.1016/j.meatsci.2020.108078
6. Leyva-Porras C., Roman 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
7. 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. N 51. DOI: 10.1186/s40066-017-0130-8
8. Ravindran R., Jaiswal A. Wholesomeness and safety aspects of irradiated foods / Food Chem. 2019. Vol. 285. P. 363 – 368. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.02.002
9. Codex Alimentarius Commission. Guidelines for the Control of Campylobacter and Salmonella in Chicken Meat. FAO, 2011. http://files.foodmate.com/2013/files_1814.html (accessed December 1, 2023).
10. Bleicher J., Ebner E., Bak K. Formation and Analysis of Volatile and Odor Compounds in Meat — A Review / Molecules. 2022. Vol. 27. 6703. DOI: 10.3390/molecules27196703
11. Yaman S., Ayhanci A. Lipid Peroxidation. In the book: Accenting Lipid Peroxidation (Ed. by P. Atukeren). — UK: IntechOpen, 2021. P. 1 – 11. DOI: 10.5772/intechopen.95802
12. Nieminen T., Dalgaard P., Björkroth J. Volatile organic compounds and Photobacterium phosphoreum associated with spoilage of modified-atmosphere-packaged raw pork / Int. J. Food Microbiol. 2016. Vol. 218. P. 86 – 95. DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2015.11.003
13. D'Oca M., Bartolotta A., Cammilleri M., 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.radphyschem.2009.03.057
14. Bliznyuk U., Avdyukhina V., Borshchegovskaya P., et al. Determination of Chemical and Microbiological Characteristics of Meat Products Treated by Radiation / Inorg. Mater. 2022. Vol. 58. P. 1422 – 1428. DOI: 10.1134/S0020168522140047
15. Bliznyuk U., Borshchegovskaya P., Bolotnik T. A., et al. The impact of accelerated electrons on volatile organic compounds in poultry and fish / Ind. Lab. Mater. Diagn. 2023. Vol. 89. N 1. P. 11 – 19 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-1-11-19
16. Feng X., Jo C., Nam K., Ahn D. Impact of electron-beam irradiation on the quality characteristics of raw ground beef / Innovative Food Sci. Emerging Technol. 2019. Vol. 54. P. 87 – 92. DOI: 10.1016/j.ifset.2019.03.010
17. Bliznyuk U., Borshchegovskaya P., Chernyaev A., et al. Computer simulation to determine food irradiation dose levels / IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. Vol. 365. 012002. DOI: 10.1088/1755-1315/365/1/012002

18. **Bliznyuk U., Borchegovskaya P., Chernyaev A., et al.** Dose-rate effect of low-energy electron beam irradiation on bacterial content in chilled turkey / *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020. Vol. 640.032006. DOI: 10.1088/1755-1315/640/3/032006
19. **Lee D., Lee H., Yoon J., et al.** Effect of Different Aging Methods on the Formation of Aroma Volatiles in Beef Strip Loins / *Foods*. 2021. Vol. 10. 146. DOI: 10.3390/foods10010146
20. **Van H., Hwang I., Jeong D., Touseef A.** Principle of Meat Aroma Flavors and Future Prospect. Chapter 7. Latest Research into Quality Control. — UK: IntechOpen, 2012. P. 145 – 176. DOI: 10.5772/51110
21. **Brewer M.** The Chemistry of Beef Flavor: Executive Summary. — USA: National Cattlemen's Beef Association, 2006. — 16 p.
22. **Zang M., Wang L., Zhang Z., et al.** Comparison of Volatile Flavor Compounds from Seven Types of Spiced Beef by Headspace Solid-phase Microextraction Combined with Gas Chromatography-olfactometry-mass Spectrometry (HS-SPME-GC-O-MS) / *Food Sci. Technol. Res.* 2020. Vol. 26. P. 25 – 37. DOI: 10.3136/fstr.26.25
23. **Tao N., Wu R., Zhou P., et al.** Characterization of odor-active compounds in cooked meat of farmed obscure puffer (*Takifugu obscurus*) using gas chromatography-mass spectrometry-olfactometry / *J. Food Drug Anal.* 2014. Vol. 22. P. 431 – 438. DOI: 10.1016/j.jfda.2014.02.005
24. **Pavan E., Ye Y., Eyres G., et al.** Relationships among Consumer Liking, Lipid and Volatile Compounds from New Zealand Commercial Lamb Loins / *Foods*. 2021. Vol. 10. 1143. DOI: 10.3390/foods10051143
25. **Jung S., Jo C., Kim I., et al.** The Influence of Spices on the Volatile Compounds of Cooked Beef Patty / *Korean J. Food Sci. Anim. Resour.* 2014. Vol. 34. P. 166 – 171. DOI: 10.5851/kosfa.2014.34.2.166
26. **Damian F., Hughes J., Piyasiri U., et al.** Volatile and non-volatile metabolite changes in 140-day stored vacuum packaged chilled beef and potential shelf life markers / *Meat Sci.* 2020. Vol. 161. 108016. DOI: 10.1016/j.meatsci.2019.108016
27. **Brewer M.** Irradiation effects on meat flavor: A review / *Meat Sci.* 2009. Vol. 81. P. 1 – 14. DOI: 10.1016/j.meatsci.2008.07.011
28. **Hunt M., Legako J., Dinh T., et al.** Assessment of volatile compounds, neutral and polar lipid fatty acids of four beef muscles from USDA Choice and Select graded carcasses and their relationships with consumer palatability scores and intramuscular fat content / *Meat Sci.* 2016. Vol. 116. P. 91 – 101. DOI: 10.1016/j.meatsci.2016.02.010
29. **Resconi V., del Mar Campo M., Montossi F., et al.** Gas chromatographic-olfactometric aroma profile and quantitative analysis of volatile carbonyls of grilled beef from different finishing feed systems / *J. Food Sci.* 2012. Vol. 77. P. 240 – 246. DOI: 10.1111/j.1750-3841.2012.02720.x
30. **Li C., He L., Jin G., et al.** 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
31. **Feng X., Ahn D.** Volatile profile, lipid oxidation and protein oxidation of irradiated ready-to-eat cured turkey meat products / *Radiat. Phys. Chem.* 2016. Vol. 127. P. 27 – 33. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2016.05.027
32. **Bliznyuk U., Borchegovskaya 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. 227. DOI: 10.3390/separations9080227
33. **Huang Q., Dong K., Wang Q., et al.** Changes in volatile flavor of yak meat during oxidation based on multi-omics / *Food Chem.* 2022. Vol. 371. 131103. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.131103
34. **Dominguez R., Purrinos L., Perez-Santaescolastica C., et al.** Characterization of volatile compounds of dry-cured meat products using HS-SPME-GC/MS technique / *Food Anal. Methods*. 2019. Vol. 12. P. 1263 – 1284. DOI: 10.1007/s12161-019-01491-x
35. **Dinh T., To K., Schilling M.** Fatty Acid Composition of Meat Animals as Flavor Precursors / *Meat Muscle Biol.* 2021. Vol. 5. P. 1 – 16. DOI: 10.22175/mmb.12251
36. **Ba H., Park K., Dashmaa D., Hwang I.** Effect of muscle type and vacuum chiller ageing period on the chemical compositions, meat quality, sensory attributes and volatile compounds of Korean native cattle beef / *Anim. Sci. J.* 2014. Vol. 85. P. 164 – 173. DOI: 10.1111/asj.12100
37. **Shahidi F.** Headspace Volatile Aldehydes as Indicators of Lipid Oxidation in Foods. In the book: *Headspace Analysis of Foods and Flavors* (Ed. by R. L. Rouseff, K. R. Cadwallader. 2019. Vol. 488. P. 113 – 123. DOI: 10.1007/978-1-4615-1247-9
38. **Kim Y., Kemp R., Samuelsson L.** Effects of dry aging on meat quality attributes and metabolite profiles of beef loins / *Meat Sci.* 2016. Vol. 111. P. 168 – 176. DOI: 10.1016/j.meatsci.2015.09.008
39. **Frank D., Ball A., Hughes J., et al.** Sensory and flavor chemistry characteristics of Australian beef: influence of intramuscular fat, feed, and breed / *J. Agric. Food Chem.* 2016. Vol. 64. P. 4299 – 4311. DOI: 10.1021/acs.jafc.6b00160
40. **Kim Y., Nam K., Ahn D.** Volatile profiles, lipid oxidation and sensory characteristics of irradiated meat from different animal species / *Meat Sci.* 2002. Vol. 61. P. 257 – 265. DOI: 10.1016/S0309-1740(01)00191-7
41. **Li Z., Ha M., Frank D., et al.** Volatile Profile of Dry and Wet Aged Beef Loin and Its Relationship with Consumer Flavour Liking / *Foods*. 2021. Vol. 10. 3113. DOI: 10.3390/foods10123113
42. **Wang X., Ma Y., Guo Y., et al.** Reinvestigation of 2-acetylthiazole formation pathways in the Maillard reaction / *Food Chem.* 2021. Vol. 345. 128761. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.128761
43. **Legako J., Cramer T., Yardley K., et al.** Retail stability of three beef muscles from grass-, legume-, and feedlot-finished cattle / *J. Anim. Sci.* 2018. Vol. 96. P. 2238 – 2248. DOI: 10.1093/jas/sky125
44. **Chen Q., Liu Q., Sun Q., et al.** Flavour formation from hydrolysis of pork sarcoplasmic protein extract by a unique LAB culture isolated from Harbin dry sausage / *Meat Sci.* 2015. Vol. 100. P. 110 – 117. DOI: 10.1016/j.meatsci.2014.10.001
45. **Wang Y., Han J., Wang D., et al.** Research Update on the Impact of Lactic Acid Bacteria on the Substance Metabolism, Flavor, and Quality Characteristics of Fermented Meat Products / *Foods*. 2022. Vol. 11. 2090. DOI: 10.3390/foods11142090
46. **Sirtori F., Dimauro C., Bozzi R., et al.** Evolution of volatile compounds and physical, chemical and sensory characteristics of Toscano PDO ham from fresh to dry-cured product / *Eur. Food Res. Technol.* 2019. Vol. 246. P. 409 – 424. DOI: 10.1007/s00217-019-03410-0
47. **Jin Y., Yuan X., Liu J., et al.** Inhibition of cholesterol biosynthesis promotes the production of 1-octen-3-ol through mevalonic acid / *Food Res. Int.* 2022. Vol. 158. P. 111392. DOI: 10.1016/j.foodres.2022.111392
48. **Karabagias I.** Volatile Profile of Raw Lamb Meat Stored at 4 ± 1°C: The Potential of Specific Aldehyde Ratios as Indicators of Lamb Meat Quality / *Foods*. 2018. Vol. 7. 40. DOI: 10.3390/foods7030040
49. **Tangerman A.** Measurement and biological significance of the volatile sulfur compounds hydrogen sulfide, methanethiol and dimethyl sulfide in various biological matrices / *J. Chromatogr. A*. 2009. Vol. 877. P. 3366 – 3377. DOI: 10.1016/j.jchromb.2009.05.026
50. **Franke C., Hilgarth M., Vogel R. F., et al.** Characterization of the dynamics of volatile organic compounds released by lactic acid bacteria on modified atmosphere packed beef by PTR-MS / *Food Packag. Shelf Life*. 2019. Vol. 22. 100400. DOI: 10.1016/j.fpsl.2019.100400