

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-10-13-19>

МОНИТОРИНГ КОНЦЕНТРАЦИИ АЛЬДЕГИДОВ В МЯСЕ КУРИЦЫ В ТЕЧЕНИЕ ПЕРИОДА ХРАНЕНИЯ ПОСЛЕ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ УСКОРЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

© Ульяна Александровна Близняук^{1,2*}, Полина Юрьевна Борщеговская^{1,2}, Тимофей Александрович Болотник³, Виктория Сергеевна Ипатова², Александр Денисович Никитченко¹, Александр Петрович Черняев^{1,2}, Олег Юрьевич Хмелевский¹, Дмитрий Сергеевич Юров², 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; *e-mail: uabliznyuk@gmail.com

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.

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.

*Статья поступила 1 августа 2022 г. Поступила после доработки 1 августа 2022 г.
Принята к публикации 25 августа 2022 г.*

Радиационный метод пищевой обработки позволяет решать ряд проблем пищевой промышленности, включая подавление патогенной микробной обсемененности, сохранение пищевой ценности продукта, а также увеличение сроков его хранения. Данный метод обработки в сочетании с высокочувствительным методом газовой хромато-масс-спектрометрии позволяет выявлять биохимические маркеры радиационной обработки в мясных продуктах с небольшим содержанием жира, таких как курица и индейка. В данной работе представлены результаты исследования зависимости содержания летучих органических соединений в охлажденном мясе курицы, обработанном ускоренными электронами с энергией 1 МэВ в дозах от 250 Гр до 20 кГр, в течение двух недель хранения. Определение летучих органических соединений в облученных и контрольных образцах продукции проводили на 0-е, 1-е, 4-е, 6-е, 8-е, 11-е и 13-е сутки после радиационной обработки. Отмечен общий характер поведения концентраций альдегидов, идентифицированных в обработанных излучением образцах мяса птицы, а именно, гексаналя, гептаналя и пентаналя, в течение двух недель хранения продукции. Установлено возрастание концентрации альдегидов в образцах, обработанных в дозах от 500 Гр до 10 кГр, на 1 – 4-е сутки после облучения. Выявлено, что с увеличением дозы облучения время накопления альдегидов в облученном мясе сдвигается в сторону меньшего периода хранения продукции. Таким образом, альдегиды возможно рассматривать как потенциальные маркеры радиационной обработки мяса курицы в течение первых четырех суток после проведения облучения.

Ключевые слова: радиационная обработка продуктов питания; мясо курицы; ускоритель электронов; парофазный анализ; газовая хроматография-масс-спектрометрия (ГХ-МС); летучие органические соединения; альдегиды.

MONITORING THE CONCENTRATION OF ALDEHYDES IN CHICKEN MEAT DURING THE STORAGE PERIOD AFTER TREATMENT BY ACCELERATED ELECTRONS

© Ulyana A. Bliznyuk^{1,2*}, Polina Yu. Borshchegovskaya^{1,2}, Timofey A. Bolotnik³, Victoria S. Ipatova², Alexander D. Nikitchenko¹, Alexander P. Chernyaev^{1,2}, Oleg Yu. Khmelevsky¹, Dmitry S. Yurov², Igor A. Rodin^{3,4}

¹ Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, 1-2, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia; *e-mail: uabliznyuk@gmail.com

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.

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 August 1, 2022. Revised August 1, 2022. Accepted August 25, 2022.

A method of food radiation treatment can address a number of problems in the food industry, including the suppression of pathogenic microbial contamination, preservation of the nutritional value of the product, and extension of the food shelf life. When combined with a highly sensitive gas chromatography-mass spectrometry, the method provides detection of biochemical markers of radiation processing in meat products with a low content of fat, such as chicken and turkey. We present the results of studying the dependence of the content of volatile organic compounds in chilled chicken meat treated with 1 MeV accelerated electrons in a dose range from 250 Gy to 20 kGy during two weeks of storage. Concentrations of volatile organic compounds in the irradiated and control samples of food samples were determined on the zeroth, 1st, 4th, 6th, 8th, 11th and 13th days after irradiation. Concentrations of aldehydes, namely, hexanal, heptanal, and pentanal identified in poultry meat samples exposed to radiation demonstrated a similar behavior during two weeks of product storage. Samples exposed to irradiation in a dose range from 500 Gy to 10 kGy exhibited an increase in the aldehyde content on days 1 – 4 after irradiation. It is shown that the time of aldehydes accumulation in irradiated meat shifts towards a shorter period of the product storage with an increase in the dosage of irradiation. Thus, aldehydes can be considered potential markers of the radiation treatment of chicken meat during the first four days after irradiation.

Keywords: radiation treatment of food; chicken meat; electron accelerator; headspace analysis; gas chromatography mass spectrometry (GC-MS); volatile organic compounds; aldehydes.

Введение

Согласно данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (Food and Agricultural Organization) одной из глобальных проблем агропромышленного сектора экономики являются потери сельскохозяйственной и пищевой продукции, вызванные ее бактериальным загрязнением и достигающие 30 % от общего объема производимых продуктов питания [1].

Все более широкое применение находит радиационный метод обработки продуктов питания и сельскохозяйственного сырья в целях предотвращения потерь продукции на этапах хранения и транспортировки, продления сроков хранения и обеспечения ее санитарно-эпидемиологической безопасности [2 – 4]. Во всем мире отмечается повышенный интерес к использованию радиационных технологий в агропромышленном комплексе в связи с активным переходом от традиционных неэкологичных методов химической обработки к инновационным «зеленым технологиям» [5].

Существующие международные стандарты ISO/ASTM^{1–5} [6] предписывают выбор источников ионизирующего излучения, а также максимальный энергетический предел обработки (для ускоренных электронов — до 10 МэВ, для тормозного излучения — до 5 МэВ) и поглощенную дозу (до 10 кГр — в Европе, Азии и России, до 20 кГр — в США). Многочисленными исследованиями показано, что дозы до 1 кГр оптимальны

для стимуляции семян, задержки прорастания корнеплодов и луковиц, уничтожения насекомых-вредителей и т.д.; обработку в дозах от 1 до 7 кГр рекомендуется применять для инактивации болезнетворной микрофлоры и увеличения сроков годности охлажденной продукции, а также фруктов и овощей; дозы от 5 до 10 кГр позволяют снизить численность микроорганизмов в сухих продуктах [7 – 9].

Несоблюдение технологических режимов обработки, а также рекомендуемых стандартами и научными исследованиями эффективных диапазонов доз [8, 10] для каждой категории продукции может привести к ухудшению ее структурных и органолептических свойств. Эти изменения связаны со свободно-радикальными химическими реакциями, активно протекающими в продукции после радиационной обработки, и реакциями деструкции белков, жиров, углеводов и т.д.

В литературе обсуждаются различные методики определения жирно-кислотного состава мясных продуктов питания и регистрации в них новообразовавшихся летучих химических соединений после воздействия ионизирующего излучения [11]. Наиболее универсальным методом идентификации летучих соединений в облученных продуктах, содержащих влагу, жировую и белковую фракции, является метод газовой хроматографии в сочетании с масс-спектрометрией

¹ ISO 14470:2011. Food irradiation. Requirements for the development, validation and routine control of the process of irradiation using ionizing radiation for the treatment of food.

² ISO/ASTM 51818:2013. International organization for standardization, American society for testing and materials. Practice for dosimetry in an electron beam facility for radiation processing at energies between 80 and 300 keV.

³ ISO/ASTM 51649:2015. International organization for standardization, American society for testing and materials. Practice for dosimetry in an electron beam facility for radiation processing at energies between 300 keV and 25 MeV.

⁴ ISO/ASTM 51608:2015. International organization for standardization, American society for testing and materials. Practice for dosimetry in an X-ray (bremsstrahlung) facility for radiation processing at energies between 50 keV and 7.5 MeV.

⁵ ISO/ASTM 51702:2013. International organization for standardization, American society for testing and materials, Practice for dosimetry in gamma irradiation facilities for food processing.

(ГХ-МС) [12 – 16], позволяющий с высокой эффективностью проводить разделение и определение близких по молекулярной массе соединений. При этом наблюдаются схожие тенденции в поведении летучих органических соединений в мясной и рыбной продукции, а именно, возрастание концентрации альдегидов с увеличением дозы облучения [9, 17, 18]. В исследованиях, содержащих органолептический анализ облученной продукции из мяса птицы, отмечается, что именно возрастание концентрации альдегидов и серосодержащих соединений является наиболее значимым при формировании специфического запаха мясной продукции [15 – 21].

Для выработки рекомендаций по проведению радиационной обработки продукта необходимо исследование химических изменений в нем в течение длительного периода хранения после обработки [18, 22].

Цель данной работы заключалась в определении летучих органических соединений в охлажденном мясе птицы после облучения ускоренными электронами в дозах от 0,25 до 20 кГр в течение двух недель хранения.

Экспериментальная часть

В качестве объекта исследования были выбраны свежие охлажденные грудки кур, забитых за сутки до проведения эксперимента, в количестве 10 штук. Опытные образцы хранили в холодильной камере при температуре 4 °С. Образцы куриной грудки массой $0,5 \pm 0,1$ г помещали в пластиковые микроцентрифужные пробирки типа Эппендорф объемом 2 мл.

Облучение образцов проводили с использованием ускорителя электронов непрерывного действия УЭЛР-1-25-Т-001, разработанного Научно-исследовательским институтом ядерной физики (НИИЯФ МГУ) имени Д. В. Скобелыцына. При проведении обработки ток пучка варьировали от 0,1 до 3 мА, максимальная энергия электронов составляла 1 МэВ.

Шесть образцов толщиной не более 3 мм в микроцентрифужных пробирках выкладывали на дюралюминиевую пластину, расположенную на расстоянии 12 см от выхода пучка электронов в соответствии со схемой облучения, описанной в работе [23]. Образцы продукции облучали в дозах 0,25, 0,5, 1, 2, 5, 10 и 20 кГр. Для контроля поглощенной дозы использовали стандартные образцы поглощенной дозы СО-ПД(Э)1/10 и СО-ПД(Ф)Р5/50 [24]. Для оценки однородности распределения дозы в образцах курицы проводили моделирование на основе метода Монте-Карло с помощью программного инструментария Geant4 [25]. Однородность облучения, равная от-

ношению максимальной дозы к минимальной в объеме образца, составляла не менее 80 %.

После облучения образцы хранили в холодильной камере при 3 – 4 °С в течение 14 суток. Определение летучих органических соединений в облученных и контрольных образцах проводили на 0-е, 1-е, 4-е, 6-е, 8-е, 11-е и 13-е сутки после облучения методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием (ГХ-МС). Для этого исследуемые образцы массой 2 г помещали в вialу для парофазного анализа, добавляли 2 мл раствора хлорида натрия (3 % масс.) в деионизованной воде, герметично закрывали и помещали в ультразвуковую ванну, где экстрагировали определяемые соединения в течение 30 мин. Затем образцы термостатировали 10 мин при 95 °С и 1 мл паровой фазы образца вводили в хроматограф.

Для определения летучих органических соединений использовали газовый хромато-масс-спектрометр Shimadzu GCMS-QP2010 Ultra (Shimadzu, Япония), снабженный автоматическим устройством ввода паровой фазы HT200H Headspace Autosampler (HTA, Италия). Сбор данных и обработку хроматограмм проводили с помощью программного обеспечения GCMSsolution, идентификацию компонентов осуществляли с использованием библиотеки масс-спектров NIST/EPA/NIH Mass Spectral Library 2008 (NIST 08).

Для разделения компонентов использовали капиллярную колонку VF-624 MS (60 м × 0,32 мм × 1,8 мкм). 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. Газ-носитель — гелий. Поток газа-носителя (гелия) через колонку составлял 1,5 см³/мин, температура испарителя — 250 °С; интерфейса — 200 °С. Образцы облучали потоком ионизирующих электронов с энергией 70 эВ (температура квадруполя — 200 °С, ионного источника — 230 °С). Хроматограммы регистрировали в режиме сканирования всех ионов от m/z 33 до 350, скорость сканирования составляла 3,3 скан/с.

Статистическую обработку полученных данных проводили с помощью пакета прикладных программ Microsoft Excel (США) и Origin (Origin Lab Corporation, США).

Обсуждение результатов

Во всех облученных и контрольных образцах было идентифицировано 9 летучих соединений: спирты (пентанол-1, гексанол-1), альдегиды (пентаналь, гексаналь, гептаналь), кетоны (ацетон, бутанон-2, пентанон-2) и сульфиды (демитил-сульфид). В таблице представлены concentra-

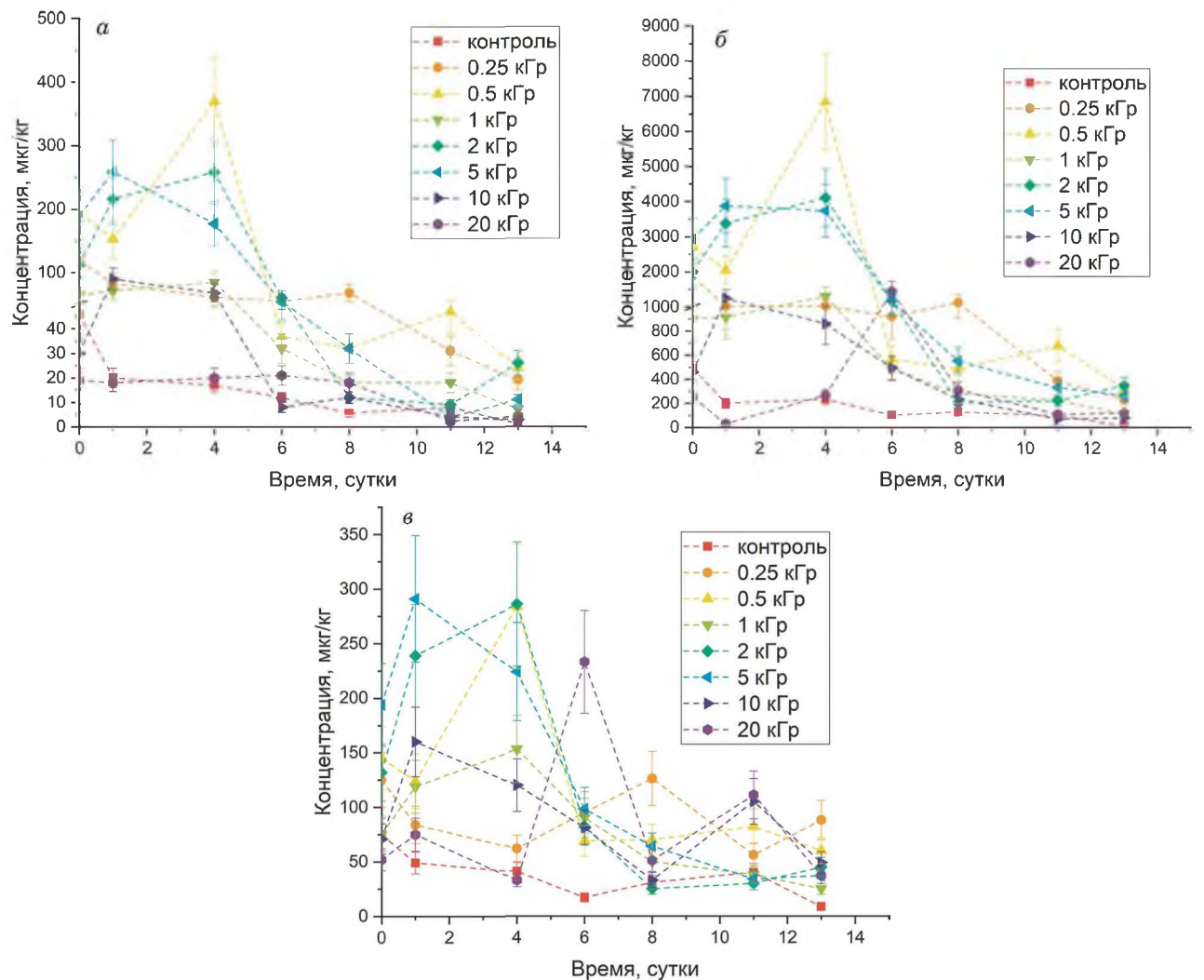


Рис. 1. Зависимость концентрации пентаналь (*а*), гексаналь (*б*), гептаналь (*в*) в образцах мяса курицы, облученных в дозах 0,25 – 20 кГр, от времени хранения

Fig. 1. Dependence of the concentration of pentanal (*a*), hexanal (*b*), heptanal (*c*) in chicken meat after irradiation at doses within 0.25 – 20 kGy on the storage time

Содержание идентифицированных соединений в исследуемых образцах (мкг/кг) в день проведения облучения (*n* = 3; *P* = 0,95)

Content of identified compounds in the samples under study (µg/kg) measured on day of irradiation (*n* = 3; *P* = 0.95)

Компонент	Доза облучения, кГр							
	0	0,25	0,5	1	2	5	10	20
Пентаналь	46 ± 9	119 ± 24	195 ± 39	65 ± 13	112 ± 22	189 ± 37	30 ± 6	19 ± 3
Гексаналь	494 ± 99	1867 ± 370	2702 ± 540	899 ± 180	2003 ± 400	2932 ± 590	458 ± 90	253 ± 50
Гептаналь	75 ± 15	125 ± 25	145 ± 29	85 ± 17	132 ± 26	194 ± 38	71 ± 14	52 ± 10
Пентанол-1	24 ± 5	66 ± 13	114 ± 23	78 ± 15	115 ± 23	252 ± 50	67 ± 13	70 ± 14
Гексанол-1	47 ± 9	41 ± 8	87 ± 17	101 ± 20	268 ± 53	1072 ± 210	222 ± 44	216 ± 43
Ацетон	72 ± 14	74 ± 15	78 ± 16	61 ± 12	51 ± 10	81 ± 16	57 ± 11	74 ± 15
Бутанон-2	59 ± 12	78 ± 16	86 ± 17	35 ± 7	37 ± 7	74 ± 14	27 ± 5	39 ± 7
Пентанон-2	3,6 ± 0,7	16 ± 3	21 ± 4	7,9 ± 1,6	15 ± 3	24 ± 4	4,6 ± 0,9	1,8 ± 0,3
Демитилсульфид	4,6 ± 0,9	13 ± 3	11 ± 2	7,1 ± 1,4	25 ± 5	52 ± 10	45 ± 9	47 ± 9

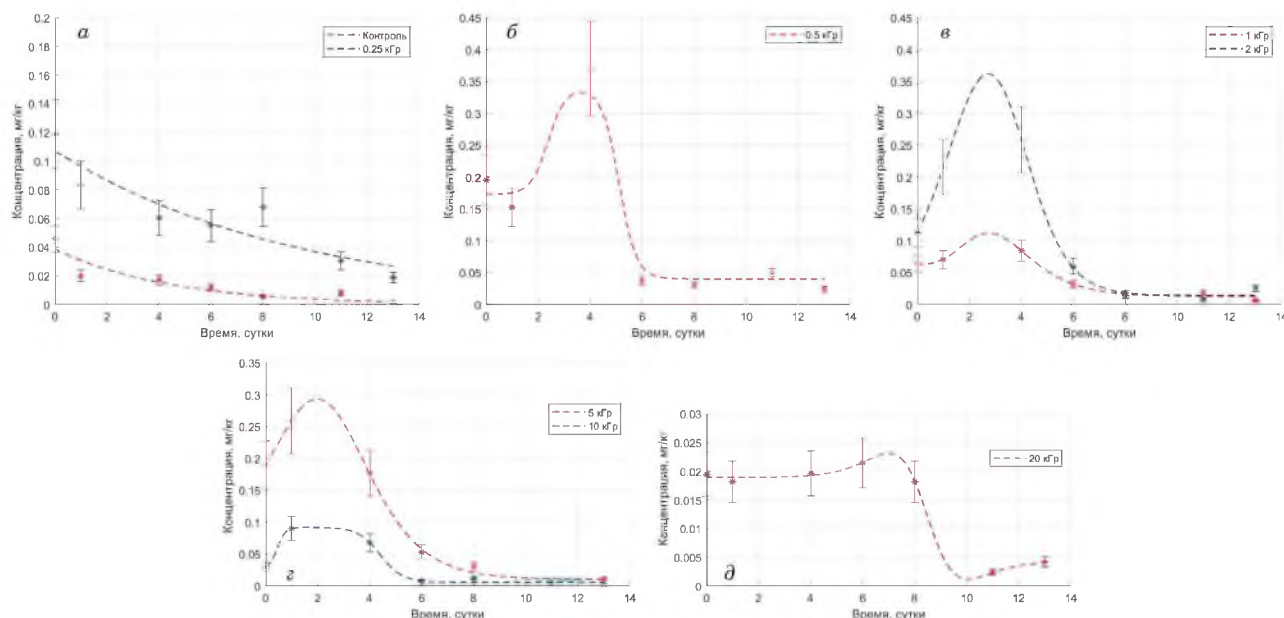


Рис. 2. Зависимости концентрации пентанала от времени хранения образцов мяса курицы, облученных в дозах (кГр): *a* — 0,25; *б* — 0,5; *в* — 1 и 2; *г* — 5 и 10; *д* — 20 и контрольных необлученных образцов (*a*)

Fig. 2. Dependences of pentanal concentration in chicken meat samples irradiated at a dose of 0. 25 kGy (*a*), 0. 5 kGy (*b*), 1 kGy and 2 kGy (*c*), 5 kGy and 10 kGy (*d*), 20 kGy (*e*), and in non-irradiated control samples (*a*) from storage time

ции летучих органических соединений в контрольных и облученных образцах мяса птицы, полученные в день проведения облучения (0-е сутки исследования).

Как видно из таблицы, для всех соединений наблюдаются нелинейные зависимости их концентрации от дозы облучения. При этом концентрация гексанала в необлученных и облученных в дозах 0,25 – 20 кГр образцах мяса курицы выше по сравнению с концентрациями других соединений, что подтверждается другими исследованиями [18, 19, 26]. Гексаналь является наиболее распространенным альдегидом, идентифицированным в мясе курицы, и считается одним из важнейших одорантов в данном виде охлажденной продукции [17, 27].

Мы провели мониторинг концентрации альдегидов в мясе курицы после ее облучения ускоренными электронами в течение длительного времени хранения. На рис. 1 представлены зависимости концентрации идентифицированных альдегидов — пентанала, гексанала и гептанала — от времени хранения в образцах продукции, облученной в дозах от 0,25 до 20 кГр.

Как видно из рис. 1, для всех альдегидов наблюдаются схожие зависимости концентраций от времени хранения для различных доз. Так, для контрольных необлученных и облученных в дозе 0,25 кГр образцов мяса курицы можно отметить нелинейный спад концентрации пентанала, гексанала и гептанала с течением времени хранения. При этом для образцов, облученных в дозе

0,25 кГр, намечается небольшой пик на 8-е сутки, а для доз свыше 0,25 кГр наблюдается явный пик возрастания концентрации альдегидов на 2 – 6-е сут хранения продукции. Можно отметить, что для образцов, обработанных в дозах 10 и 20 кГр, значения концентраций альдегидов на 0-е сутки лежат в пределах контрольных значений, а в течение дальнейшего хранения образцов концентрации как превышают контрольные показатели, так и меньше них. Для доз облучения от 0,25 до 5 кГр включительно концентрации исследуемых альдегидов выше контрольных значений в течение всего времени хранения.

На рис. 2 представлены экспериментальные значения концентраций пентанала в образцах мяса курицы, облученных в дозах от 0,25 до 20 кГр, от времени хранения.

Из рис. 2, *б, г* видно, что при увеличении дозы облучения от 0,5 до 10 кГр наблюдается характерное возрастание концентраций пентанала в образцах курицы в первые четверо суток хранения. При этом для образцов, облученных в дозе 0,5 кГр, максимальное значение концентрации достигается на первые сутки, для доз 1 и 2 кГр — между первыми и четвертыми сутками наблюдения, а для доз 5 и 10 кГр пик концентрации пентанала приходится на первые сутки хранения. Результаты определения других альдегидов, идентифицированных в образцах курицы после ее облучения в течение двух недель ее хранения, носят аналогичный характер. Таким образом, с увеличением дозы облучения накопление альде-

гидов в облученном мясе происходит на 1 – 4-е сутки хранения.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что для всех облученных образцов в диапазоне доз от 0,25 до 5 кГр концентрации идентифицируемых альдегидов выше контрольных значений в течение всего периода хранения, а для доз 10 и 20 кГр значения концентраций гексаналя, гептаналя и пентаналя как ниже, так и выше контрольных показателей на протяжении всего времени исследования. При этом концентрации альдегидов в образцах курицы, обработанных в дозе 0,25 кГр, и в контрольных необлученных образцах экспоненциально уменьшаются с течением времени хранения.

Установлено, что в первые четверо суток хранения наблюдается пик накопления гексаналя, гептаналя и пентаналя в образцах мяса птицы, облученных в дозах от 0,5 до 10 кГр, причем с увеличением дозы обработки пик накопления альдегидов сдвигается в сторону меньшего времени хранения. Таким образом, идентифицируемые альдегиды могут являться потенциальными маркерами радиационной обработки охлажденного мяса курицы в течение первых четырех суток после обработки в дозах свыше 0,5 кГр.

Благодарности

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

ЛИТЕРАТУРА

1. The State of Food and Agriculture 2019. Moving forward on food loss and waste reduction. www.fao.org (дата обращения 1.08.2022).
2. 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.
3. CAC, 2003. CODEX STAN 106-1983, Rev. 1-2003. General Standard for Irradiated Foods. Codex Alimentarius, FAO/WHO, Rome.
4. Черняев А. П. Радиационные технологии: Наука. Народное хозяйство. Медицина. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2019. — 231 с.
5. Radiation technology for cleaner products and processes: proceedings of the Technical Meeting on Deployment of Clean (Green) Radiation Technology for Environmental Remediation. IAEA-TECDOC No. 1786. — Vienna: International Atomic Energy Agency, 2016. — 246 p.
6. Dosimetry for food irradiation. Technical Reports Series No. 409. — Vienna: International Atomic Energy Agency, 2002. — 172 p.
7. Manual of Good Practice in Food Irradiation. Sanitary, Phytosanitary and Other Applications. Technical Reports Series No. 481. — Vienna: International Atomic Energy Agency, 2015. — 85 p.
8. Павлов А. Н., Чиж Т. В., Снегирев А. С. и др. Технологический процесс радиационной обработки пищевой продукции и дозиметрическое обеспечение / Радиационная гигиена. 2020. Т. 13. № 4. С. 40 – 50. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-40-50
9. Agbaka J. I., Ibrahim A. N. Irradiation: Utilization, Advances, Safety, Acceptance, Future Trends, and a Means to Enhance Food Security / Adv. Appl. Sci. Res. 2020. Vol. 11. N 3. P. 1. DOI: 10.36648/0976-8610.11.3.1
10. 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. N 1. P. 750. DOI: 10.1038/s41598-021-04733-3
11. Близнюк У. А., Авдюхина В. М., Борщеговская П. Ю. и др. Определение микробиологических и химических показателей мясной продукции после обработки электронным излучением / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 6. С. 5 – 13. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-6-5-13
12. Karabagias I. A. Volatile Profile of Raw Lamb Meat Stored at $4 \pm 1^\circ\text{C}$: The Potential of Specific Aldehyde Ratios as Indicators of Lamb Meat Quality / Foods. 2018. Vol. 7. N 3. P. 40. DOI: 10.3390/foods7030040
13. Guo H., Feng T., Qi W., et al. Effects of electron-beam irradiation on volatile flavor compounds of salmon fillets by the molecular sensory science technique / J. Food Sci. 2021. Vol. 86. N 1. P. 184 – 193. DOI: 10.1111/1750-3841.15541
14. Campaniello M., Marchesani G., Zianni R. Validation of an alternative method for the identification of 2-Dodecylcyclobutanone (2-DCB) of irradiated meats by solid-phase microextraction (SPME) Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) / Int. J. Food Sci. Tech. 2020. Vol. 55. N 3. P. 961 – 969. DOI: 10.1111/ijfs.14353
15. Zheng Q., Wang H., Yue L., et al. Effect of irradiation on volatile compound profiles and lipid oxidation in chicken powder seasoning / Radiat. Phys. Chem. 2022. Vol. 191. 109851. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2021.109851
16. Jo Y., An K.-A., Arshad M. S., Kwon J.-H. Effects of e-beam irradiation on amino acids, fatty acids, and volatiles of smoked duck meat during storage / Innovative Food Sci. Emerging Technol. 2018. Vol. 47. P. 101 – 109. DOI: 10.1016/J.IFSET.2017.12.008
17. Bak K. H., Rankin S., Richards M. P. Hexanal as a marker of oxidation flavour in sliced and uncured deli turkey with and without phosphates using rosemary extracts / Int. J. Food Sci. Technol. 2020. Vol. 55. N 9. P. 3104 – 3110. DOI: 10.1111/ijfs.14574
18. Kwon J.-H., Kwon Y., Nam K.-C., et al. Effect of electron-beam irradiation before and after cooking on the chemical properties of beef, pork, and chicken / Meat Sci. 2008. Vol. 80. N 3. P. 903 – 909. DOI: 10.1016/j.meatsci.2008.04.009
19. Du M., Nam K., Hur S., et al. Quality characteristics of irradiated chicken breast rolls from broilers fed different levels of conjugated linoleic acid / Meat Sci. 2003. Vol. 63. N 2. P. 249 – 255. DOI: 10.1016/S0309-1740(02)00077-3
20. Feng X., Moon S. H., Lee H. Y., Ahn D. U. Effect of irradiation on the parameters that influence quality characteristics of raw turkey breast meat / Radiat. Phys. Chem. 2017. Vol. 130. P. 40 – 46. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2016.07.015
21. Marco A., Navarro J. L., Flores M. Quantitation of Selected Odor-Active Constituents in Dry Fermented Sausages Prepared with Different Curing Salts / J. Agric. Food Chem. 2007. Vol. 55. N 8. P. 3058 – 3065. DOI: 10.1021/jf0631880
22. Zhu M., Lee E., Mendonca A., Ahn D. Effect of irradiation on the quality of turkey ham during storage / Meat Sci. 2004. Vol. 66. N 1. P. 63 – 68. DOI: 10.1016/S0309-1740(03)00014-7
23. Черняев А. П., Авдюхина В. М., Близнюк У. А. и др. Исследование эффективности радиационной обработки фореи электронным и рентгеновским излучениями / Изв. Росс. акад. наук. Серия физическая. 2020. Т. 84. № 4. С. 501 – 507. DOI: 10.31857/S0367676520040055
24. Тенишев В. П., Емельяненко И. А. Разработка чувствительных плёночных стандартных образцов поглощенной

- дозы для диапазона 50 – 1000 Гр / Эталоны. Стандартные образцы. 2019. Т. 15. № 3. С. 33 – 40.
DOI: 10.20915/2077-1177-2018-15-3-33-40
25. **Agostinelli S., Allison J., Amako K., et al.** GEANT4 — a simulation toolkit / Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A. 2003. Vol. 506. N 3. P 250 – 303.
DOI: 10.1016/s0168-9002(03)01368-8
 26. **Jayasena D. D., Ahn D. U., Nam K. C., Jo C.** Flavour Chemistry of Chicken Meat: A Review / Asian-Australas. J. Anim. Sci. 2013. Vol. 26. N 5. P 732 – 742.
DOI: 10.5713/ajas.2012.12619
 27. **Shahidi F., Pegg R. B.** Hexanal as an Indicator of the Flavor Deterioration of Meat and Meat Products / Chem. Inform: Selected Abstracts in Chemistry. 1994. Vol. 25. N 47.
DOI: 10.1002/chin.199447316
- ## REFERENCES
1. The State of Food and Agriculture 2019. Moving forward on food loss and waste reduction. www.fao.org (accessed 01.08.2022).
 2. 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.
 3. CAC, 2003. CODEX STAN 106-1983, Rev. 1-2003. General Standard for Irradiated Foods. Codex Alimentarius, FAO/WHO, Rome.
 4. **Chernyaev A. P.** Radiation Technologies: Science. National Economy. Medicine. — Moscow: Izd. Mosk. Univ., 2019. — 234 p. [in Russian].
 5. Radiation technology for cleaner products and processes: proceedings of the Technical Meeting on Deployment of Clean (Green) Radiation Technology for Environmental Remediation. IAEA-TECDOC No. 1786. — Vienna: International Atomic Energy Agency, 2016. — 246 p.
 6. Dosimetry for food irradiation. Technical Reports Series No. 409. — Vienna: International Atomic Energy Agency, 2002. — 172 p.
 7. Manual of Good Practice in Food Irradiation. Sanitary, Phytosanitary and Other Applications. Technical Reports Series No. 481. — Vienna: International Atomic Energy Agency, 2015. — 85 p.
 8. **Pavlov A. N., Chizh T. V., Snegirev A. S., et al.** Technological process of food irradiation and dosimetric support / Radiats. Gigiena. 2020. Vol. 13. N 4. P 40 – 50 [in Russian].
DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-40-50
 9. **Agbaka J. I., Ibrahim A. N.** Irradiation: Utilization, Advances, Safety, Acceptance, Future Trends, and a Means to Enhance Food Security / Adv. Appl. Sci. Res. 2020. Vol. 11. N 3. P 1. DOI: 10.36648/0976-8610.11.3.1
 10. **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. N 1. P 750. DOI: 10.1038/s41598-021-04733-3
 11. **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
 12. **Karabagias I. A.** Volatile Profile of Raw Lamb Meat Stored at $4 \pm 1^\circ\text{C}$: The Potential of Specific Aldehyde Ratios as Indicators of Lamb Meat Quality / Foods. 2018. Vol. 7. N 3. P 40.
DOI: 10.3390/foods7030040
 13. **Guo H., Feng T., Qi W., et al.** Effects of electron-beam irradiation on volatile flavor compounds of salmon fillets by the molecular sensory science technique / J. Food Sci. 2021. Vol. 86. N 1. P 184 – 193. DOI: 10.1111/1750-3841.15541
 14. **Campaniello M., Marchesani G., Zianni R.** Validation of an alternative method for the identification of 2-dodecylcyclobutane (2-DCB) of irradiated meats by solid-phase micro-extraction (SPME) Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) / Int. J. Food Sci. Tech. 2020. Vol. 55. N 3. P 961 – 969.
DOI: 10.1111/ijfs.14353
 15. **Zheng Q., Wang H., Yue L., et al.** Effect of irradiation on volatile compound profiles and lipid oxidation in chicken powder seasoning / Radiat. Phys. Chem. 2022. Vol. 191. 109851.
DOI: 10.1016/j.radphyschem.2021.109851
 16. **Jo Y., An K.-A., Arshad M. S., Kwon J.-H.** Effects of e-beam irradiation on amino acids, fatty acids, and volatiles of smoked duck meat during storage / Innovative Food Sci. Emerging Technol. 2018. Vol. 47. P 101 – 109.
DOI: 10.1016/j.ifset.2017.12.008
 17. **Bak K. H., Rankin S., Richards M. P.** Hexanal as a marker of oxidation flavour in sliced and uncured deli turkey with and without phosphates using rosemary extracts / Int. J. Food Sci. Technol. 2020. Vol. 55. N 9. P 3104 – 3110.
DOI: 10.1111/ijfs.14574
 18. **Kwon J.-H., Kwon Y., Nam K.-C., et al.** Effect of electron-beam irradiation before and after cooking on the chemical properties of beef, pork, and chicken / Meat Sci. 2008. Vol. 80. N 3. P 903 – 909. DOI: 10.1016/j.meatsci.2008.04.009
 19. **Du M., Nam K., Hur S., et al.** Quality characteristics of irradiated chicken breast rolls from broilers fed different levels of conjugated linoleic acid / Meat Sci. 2003. Vol. 63. N 2. P 249 – 255. DOI: 10.1016/s0309-1740(02)00077-3
 20. **Feng X., Moon S. H., Lee H. Y., Ahn D. U.** Effect of irradiation on the parameters that influence quality characteristics of raw turkey breast meat / Radiat. Phys. Chem. 2017. Vol. 130. P 40 – 46. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2016.07.015
 21. **Marco A., Navarro J. L., Flores M.** Quantitation of Selected Odor-Active Constituents in Dry Fermented Sausages Prepared with Different Curing Salts / J. Agric. Food Chem. 2007. Vol. 55. N 8. P 3058 – 3065. DOI: 10.1021/jf0631880
 22. **Zhu M., Lee E., Mendonca A., Ahn D.** Effect of irradiation on the quality of turkey ham during storage / Meat Sci. 2004. Vol. 66. N 1. P 63 – 68. DOI: 10.1016/s0309-1740(03)00014-7
 23. **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 / Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. Vol. 84. N 4. P 385 – 390. DOI: 10.3103/s106287382004005x
 24. **Tenishev V. P., Emel'yanenko I. A.** Radiation-sensitive film compositions for measuring absorbed doses within the 50 – 1000 Gy range / Étalony. Stand. Obraztsy. 2019. Vol. 15. N 3. P 33 – 40 [in Russian].
DOI: 10.20915/2077-1177-2018-15-3-33-40
 25. **Agostinelli S., Allison J., Amako K., et al.** GEANT4 — a simulation toolkit / Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A. 2003. Vol. 506. N 3. P 250 – 303.
DOI: 10.1016/s0168-9002(03)01368-8
 26. **Jayasena D. D., Ahn D. U., Nam K. C., Jo C.** Flavour Chemistry of Chicken Meat: A Review / Asian-Australas. J. Anim. Sci. 2013. Vol. 26. N 5. P 732 – 742. DOI: 10.5713/ajas.2012.12619
 27. **Shahidi F., Pegg R. B.** Hexanal as an Indicator of the Flavor Deterioration of Meat and Meat Products / Chem. Inform: Selected Abstracts in Chemistry. 1994. Vol. 25. N 47.
DOI: 10.1002/chin.199447316