

© КУЗЬМИН С.В., РУСАКОВ В.Н., 2025

Читать
онлайн 
Read
online

Кузьмин С.В., Русаков В.Н.

Нормирование радиолитических продуктов в облучённых пищевых продуктах: механизмы, безопасность, регулирование и аналитический контроль (аналитический обзор)

ФБУН «Федеральный научный центр гигиены имени Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Мытищи, Россия

РЕЗЮМЕ

Продукты радиолиза, образующиеся при радиационной обработке пищевых продуктов, являются ключевым объектом обсуждения при оценке безопасности технологий облучения. В обзоре систематизированы данные о механизмах радиолиза основных компонентов пищи (липидов, белков, углеводов, витаминов) и формировании специфических низкомолекулярных соединений, в том числе 2-алкилцикlobутанонов, фуранов, органических кислот и других маркеров радиационного воздействия.

Предробно рассмотрены токсикологические характеристики этих соединений по данным экспериментальных исследований 1960–2025 гг.: модели *in vitro* и *in vivo*, многогенерационные и подострые эксперименты, клинические наблюдения и регуляторные оценки FAO/WHO/IAEA, EFSA, FDA и национальных органов. Особое внимание уделено 2-алкилцикlobутанонам как специфическим продуктам радиолиза жиров, а также фурану и акриламиду, образующимся преимущественно при термической обработке.

Приведён обзор международных подходов к регулированию облученных продуктов (ЕС, США, страны Азии, Латинской Америки, Африки и Ближнего Востока) с акцентом на нормирование, охватывающее преимущественно процессы (дозы, перечень продукции, маркировка), а не устанавливавшее предельно допустимые концентрации (ПДУ) отдельных продуктов радиолиза. Описаны современные методы аналитического контроля – хроматографические, спектроскопические, люминесцентные и неразрушающие (гиперспектральная визуализация, мультиомные подходы). Показано, что при соблюдении регламентированных доз облучения концентрации продуктов радиолиза не представляют дополнительного риска для здоровья по сравнению с традиционными технологическими процессами.

Ключевые слова: облучение пищевых продуктов; продукты радиолиза; 2-алкилцикlobутаноны; фураны; акриламид; радиационная обработка; токсикологическая оценка; нормативное регулирование; аналитический контроль

Для цитирования: Кузьмин С.В., Русаков В.Н. Нормирование радиолитических продуктов в облучённых пищевых продуктах: механизмы, безопасность, регулирование и аналитический контроль (аналитический обзор). Гигиена и санитария. 2025; 104(12): 1711–1720. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-12-1711-1720> <https://elibrary.ru/pmajom>

Для корреспонденции: Русаков Владимир Николаевич, e-mail: vladrus2005@gmail.com

Участие авторов: Кузьмин С.В. – концепция и подготовка статьи; Русаков В.Н. – концепция, сбор и обработка материала, написание текста, редактирование. Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Поступила: 27.10.2025 / Поступила после доработки: 22.11.2025 / Принята к печати: 02.12.2025 / Опубликована: 15.01.2026

Sergey V. Kuzmin, Vladimir N. Rusakov

Radiolysis products in irradiated foods: mechanisms, safety, regulation, and analytical control (analytical review)

Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishchi, 141014, Russian Federation

ABSTRACT

Radiolysis products formed during radiation processing of foods are a central focus in the safety evaluation of food irradiation technologies. This review systematizes data on the mechanisms of radiolysis of the main food components (lipids, proteins, carbohydrates, vitamins) and the formation of specific low-molecular-weight compounds, including 2-alkylcyclobutanones, furans, organic acids, and other markers of radiation exposure.

The toxicological characteristics of these compounds are examined in detail based on experimental studies from 1960 to 2025, including “*in vitro*” and “*in vivo*” models, multigenerational and subchronic experiments, clinical observations, and regulatory evaluations by FAO/WHO/IAEA, EFSA, FDA and national authorities. Particular attention is paid to 2-alkylcyclobutanones as specific radiolysis products of lipids, as well as to furan and acrylamide, which are formed predominantly during thermal processing.

The paper provides an overview of international regulatory approaches to irradiated foods (EU, USA, countries of Asia, Latin America, Africa and the Middle East), emphasizing that regulation is based mainly on process control (dose, list of authorized products, labelling) rather than on establishing maximum permissible concentrations of individual radiolysis products. There are described methods of analytical control, including chromatographic, spectroscopic, luminescent, and non-destructive approaches (hyperspectral imaging, multi-omics tools). It is shown that, when regulated irradiation doses are observed, the concentrations of radiolysis products do not pose an additional health risk compared with conventional technological processes.

Keywords: food irradiation; radiolysis products; 2-alkylcyclobutanones; furans; acrylamide; radiation processing; toxicological assessment; regulatory control; analytical monitoring

For citation: Kuzmin S.V., Rusakov V.N. Radiolysis products in irradiated foods: mechanisms, safety, regulation, and analytical control (analytical review). *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2025; 104(12): 1711–1720. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-12-1711-1720> <https://elibrary.ru/pmajom> (In Russ.)

For correspondence: Vladimir N. Rusakov, e-mail: vladrus2005@gmail.com

Contributions: Kuzmin S.V. – article concept and preparation; Rusakov V.N. – material collection and processing, writing, editing. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

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

Funding. The study had no sponsorship.

Received: October 27, 2025 / Revised: November 22, 2025 / Accepted: December 2, 2025 / Published: January 15, 2026

Введение

Радиационная обработка пищевых продуктов рассматривается как эффективный метод повышения микробиологической безопасности, продления сроков хранения и снижения риска пищевых инфекций. Ионизирующее излучение используется для инактивации патогенных микроорганизмов и паразитов, подавления прорастания (картофель, лук), замедления процессов порчи и обеспечения фитосанитарных требований при международной торговле [1–3].

Ключевым объектом научной и регуляторной дискуссии остаются продукты радиолиза – вторичные соединения, возникающие при взаимодействии радиационно-индуцированных радикалов с макромолекулами пищевой матрицы. Радиолиз воды приводит к образованию гидроксильных радикалов, атомарного водорода, гидратированных электронов и других реакционноспособных частиц, которые инициируют цепь реакций окисления, фрагментации и перегруппировки органических соединений [4–7]. Уже в 1981 г. Совместный комитет экспертов ФАО/ВОЗ/МАГАТЭ по безвредности облучённой пищи (JECFI) пришёл к выводу, что облучение любых пищевых продуктов до средней дозы 10 кГр не даёт токсикологических оснований для запрета технологии и не требует дополнительного тестирования каждого конкретного продукта [1]. В 2011 г. Европейское агентство по безопасности продуктов питания (EFSA), пересмотрев массив данных о химической безопасности облучения, подтвердило, что при соблюдении установленных доз и перечня продукции применение ионизирующего излучения не приводит к дополнительным рискам для здоровья потребителя [2, 5].

На этом фоне особое значение приобретает систематизация знаний о составе и токсикологическом значении продуктов радиолиза, в том числе о специфических маркёрах облучения (2-алкилцикlobутаноны) и соединениях, обсуждаемых в связи с канцерогенным риском (фуран, акриламид и др.).

Целью настоящей работы является аналитический обзор:

- механизмов радиолиза основных компонентов пищевой продукции и формируемых классов продуктов радиолиза;
- токсикологической характеристики ведущих продуктов радиолиза (2-алкилцикlobутаноны, фураны, производные сахара, продукты окисления липидов и белков);
- международных подходов к регламентации облучения пищевых продуктов с учётом роли продуктов радиолиза в оценке безопасности;
- современных методов аналитического контроля содержания продуктов радиолиза и идентификации факта облучения;
- перспектив использования радиационной обработки с учётом химической и токсикологической безопасности.

Радиолиз пищевых компонентов и классы продуктов радиолиза

Радиационная химия воды и органических молекул. Основным первичным событием при облучении пищевых продуктов является радиолиз воды, в результате которого образуются гидроксильные радикалы ($\cdot\text{OH}$), гидратированные электроны, радикалы водорода ($\cdot\text{H}$), перекись водорода и другие реакционноспособные частицы [4, 5]. Эти виды инициируют цепные реакции с участием макромолекул (липидов, белков, углеводов) и низкомолекулярных компонентов (витаминов, органических кислот), приводя к образованию широкого спектра продуктов радиолиза.

Липиды и 2-алкилцикlobутаноны. Липиды (триацилглицерины) являются одним из основных субстратов радиолиза. При взаимодействии с радикалами происходит разрыв углерод-углеродных связей в жирных кислотах с последующим внутримолекулярным циклированием и образованием 2-алкилцикlobутанонов (2-ACB) – специфических маркёров облучения жиров [5]. Наиболее изучены 2-додецилцикlobутанон (2-DCB, производное пальмитиновой кислоты) и 2-тетрадецилцикlobутанон (производное сте-

ариновой кислоты). Эти соединения практически не образуются при кулинарной термической обработке в сопоставимых количествах, что делает их высокоспецифичными индикаторами факта облучения жиро содержащих продуктов (мясо, птица, рыба, молочные продукты) [6].

Выход 2-ACB линейно зависит от дозы облучения и содержания жира. Концентрации, как правило, составляют единицы (десятки) мкг/г жира на 1 кГр; при типичных дозах 1–5 кГр суммарное содержание 2-ACB остаётся на уровне, сопоставимом с другими продуктами окислительной деградации липидов [7].

Белки и аминокислоты. Белки и аминокислоты при облучении подвергаются реакциям окисления (образование карбонильных групп, сульфоксидов, сшивок), дезаминирования, дезкарбоксилирования и частичному расщеплению цепей [4, 8]. Важный продукт радиолиза белков – орто-тирозин, образующийся при гидроксилировании фенилаланина гидроксильными радикалами, который рассматривается как дополнительный дозиметрический маркёр радиационной обработки белковых матриц.

Углеводы, витамин С, фураны и органические кислоты. Углеводы и аскорбиновая кислота под действием свободных радикалов декомпозируются с образованием низкомолекулярных альдегидов, кетонов, органических кислот и фурановых производных. На модельных системах показано, что при облучении водных растворов глюкозы, фруктозы, сахарозы и витамина С образуются уксусная и муравьиная кислоты, 2-фурфурол, 5-гидроксиметилфурфурол (HMF), фурфуровый спирт, 2-фуровая кислота и 2(5Н)-фуранон [4]. Эти соединения хорошо известны и как продукты термической обработки (карамелизация, реакции Майера). Сравнение концентраций показывает, что их уровни при облучении, как правило, сопоставимы или ниже, чем при пастеризации и стерилизации [9–11].

Особый интерес представляют фуран и акриламид, классифицируемые IARC как возможные (вероятные) канцерогены. Они образуются преимущественно при высокотемпературной обработке (жарка, обжарка, выпечка) в углеводно-белковых матрицах, тогда как при облучении их образование *de novo* выражено значительно слабее [10, 11].

Токсикологическая характеристика продуктов радиолиза

Международные экспертизы и предел 10 кГр. Совместный экспертный комитет ФАО/ВОЗ/МАГАТЭ по безвредности облучённой пищи (JECFI) в 1980 г. обобщил результаты многолетних исследований токсичности облучённых рационов и продуктов радиолиза и пришёл к ключевому выводу: облучение любой пищевой продукции до средней дозы 10 кГр приемлемо с точки зрения безопасности, и дополнительное токсикологическое тестирование таких продуктов не требуется [1]. Комитет не выявил тератогенных, мутагенных или канцерогенных эффектов ни при кратковременном, ни при длительном потреблении рационов, полностью или преимущественно состоящих из облучённых продуктов [1].

В 2011 г. EFSA опубликовало развёрнутое заключение о химической безопасности облучения пищи, подтвердившее, что:

- ионизирующее излучение вызывает в пищевых продуктах радиолитические превращения, однако их спектр и уровни сопоставимы с изменениями при традиционной термообработке;
- отсутствуют данные, свидетельствующие о необходимости введения ПДУ для отдельных продуктов радиолиза;
- целесообразно регулировать облучение через установление допустимых доз, перечня разрешённых продуктов и требований к маркировке [2, 3].

Позиции JECFI и EFSA поддерживаются и другими авторитетными обзорами, подчёркивающими, что совокупный пакет токсикологических данных об облучённой пище

по уровню доказательности сопоставим с традиционными технологиями обработки (пастеризация, стерилизация) [5, 8].

2-алкилциклогубаноны как специфические продукты радиолиза жиров. Уровни образования и экспозиции. 2-Алкилциклогубаноны формируются только при облучении жиров и не образуются в значимых количествах при других технологических воздействиях [6, 7]. Их содержание в пищевых продуктах зависит от поглощённой дозы и массовой доли жира, типичные уровни при дозах 1–5 кГр составляют единицы (десятки) мкг/г жира.

Сопоставление расчётов диетарных экспозиций с данными токсикологических исследований показывает, что уровень 2-ACB, потребляемых населением даже при максимальном использовании технологии, на несколько порядков ниже доз, вызывающих эффекты в экспериментальных моделях [6, 11, 12].

Экспериментальные модели канцерогенеза. В ряде работ 1990–2000-х годов изучалась роль 2-ACB как возможных промоторов канцерогенеза толстой кишки. Наиболее цитируемое исследование F. Raul и соавт. показало, что добавление 2-DCB в рацион крыс, экспонированных азоксиметаном (АОМ), приводило к увеличению числа и размеров опухолей толстой кишки [13]. Авторы трактовали 2-DCB как потенциальный промотор опухолевого процесса.

Ключевым ограничением этих работ было то, что применяющиеся дозы 2-ACB во много раз превышали возможное реальное поступление с пищей. EFSA и другие эксперты отмечают, что перенос подобных эффектов high-dose напрямую на диетарные экспозиции человека некорректен [2, 3].

Современные критические обзоры и подострые эксперименты *in vivo*. Современный этап изучения токсичности 2-алкилциклогубанонов (2-ACB) характеризуется переходом от отдельных фрагментарных работ к комплексным критическим обзорам и стандартизованным подострым (хроническим) исследованиям *in vivo*. Ключевым обобщающим источником является критический обзор Song B.S. и соавт. (2014), в котором систематизированы данные экспериментов *in vitro*, *in vivo* и результаты многоцентровых токсикологических исследований 2-ACB, в том числе работы H. Delincée, F. Raul, E. Marchionni и др. [6, 12–15]. Авторы отмечают, что выявляемые генотоксические и промоторные эффекты возникают преимущественно в условиях очень высоких доз 2-ACB (на несколько порядков выше реальной пищевой экспозиции), тогда как перенос этих результатов на реальные уровни потребления ограничен [6].

Важное место занимает многоцентровое токсикологическое исследование E. Marchionni и соавт. (2004), в котором оценивали цитотоксичность и генотоксичность 2-ACB в различных тест-системах, а также влияние 2-DCB и 2-tDCB в диетарных моделях [14]. Это исследование стало одним из основных источников данных, использованных регуляторами (EFSA, национальные органы) при пересмотре оценок риска: было показано, что при высоких концентрациях возможны повреждения ДНК в отдельных моделях *in vitro*, но полученные значения доз не сопоставимы с реальным диетарным поступлением.

Ряд классических работ H. Delincée и соавт. показал, что 2-DCB может индуцировать повреждения ДНК в клеточных системах (комет-тест, хромосомные aberrации) при высоких концентрациях [15]. Эти данные легли в основу гипотезы о возможном промоторном эффекте 2-ACB в канцерогенезе толстой кишки. В то же время последующие исследования Sommers C.H. и соавт. не подтвердили мутагенность 2-DCB в модифицированном тесте Эймса, что указывает на зависимость результатов от выбранной тест-системы и условий экспонирования [15].

Критический анализ совокупности таких результатов был выполнен не только в научных обзорах, но и в регуляторных документах. EFSA (2011) выделило 2-ACB в самостоятельный раздел заключения по химической безопасности облучения, указав, что имеющиеся генотоксические эффекты наблюдались в условиях явно завышенной дозо-

вой нагрузки, а оценка диетарной экспозиции показывает многократный запас безопасности [2]. Аналогичный вывод содержится в оценке Health Canada, где сопоставлены реальные уровни 2-ACB в облучённой пище с дозами, использованными в экспериментальных исследованиях. Отмечено, что даже при максимальном сценарии потребления получаемые величины экспозиции остаются в зоне, далёкой от эффект-уровней, выявленных в испытаниях на животных [16]. Обзоры C.H. Sommers и соавт., P.B. Roberts, R. Ravindran и A.K. Jaiswal также подчёркивают, что 2-ACB являются прежде всего специфическими маркёрами облучения, а не самостоятельными критическими токсикантами при реальных уровнях их присутствия в рационе [5, 17, 18].

Качественно новый этап развития доказательной базы связан с проведением стандартизованных подострых и 90-дневных экспериментов по OECD-подходам. В работе Song B.S. и соавт. (2018) проведена острая и 28-дневная пероральная токсикологическая оценка 2-додецилциклогубанона (2-DCB) у грызунов [12]. Было показано, что LD₅₀ превышает 2000 мг/кг массы тела, а в 28-дневном исследовании повторного введения 2-DCB крысам NOAEL составил 1 мг/кг массы тела в сутки по совокупности клинических, гематологических, биохимических и гистопатологических показателей [12]. Сопоставление этой величины с оценками диетарной экспозиции показывает, что фактическое поступление 2-DCB с облучённой пищей у человека на несколько порядков ниже установленных в эксперименте уровней без эффекта.

Другим ключевым исследованием является работа M. Sato и соавт., в которой оценивали 90-дневную пероральную токсичность 2-тетрадецилциклогубанона (2-tDCB) на крысах F344, а также его возможное влияние на канцерогенез толстой кишки, индуцированный азоксиметаном (АОМ) [19]. Животные получали 2-tDCB с кормом в концентрациях 0; 12; 60 и 300 ppm (\approx 0,7–17 мг/кг/сут). Авторы не выявили системной токсичности и статистически значимого увеличения частоты или тяжести опухолей толстой кишки по сравнению с группой животных, получавших только АОМ; морфологические изменения носили адаптационный характер и не сопровождались клинически значимыми нарушениями [19]. Эти данные прямо опровергают предположение о сильном промоторном влиянии 2-ACB на АОМ-индуцированный канцерогенез при реалистичных уровнях экспозиции.

Дополнительный вклад в понимание профиля безопасности 2-ACB внесли исследования метаболизма и генотоксичности *in vivo*. В исследовании F. Hijaz и соавт. изучен метаболизм 2-DCB *in vitro* и *in vivo* у крыс: показано, что соединение быстро метаболизируется и выводится, не накапливаясь в тканях, а образующиеся метаболиты по своей структуре сходны с обычными продуктами β-окисления [20]. В работе R. Martins и соавт. изучена в модели на крысах генотоксичность смеси 2-ACB при потреблении облучённого какао-масла; использование комет-теста и других маркёров повреждения ДНК не выявило генотоксических эффектов в клетках печени при уровнях экспозиции, близких к возможным пищевым [21]. Включение этих данных в критические обзоры (B.S. Song и соавт., регуляторные отчёты EFSA, Health Canada) позволило сделать более взвешенный вывод о низкой вероятности генотоксического (канцерогенного) риска 2-ACB при реальном потреблении.

Таким образом, современные критические обзоры и стандартизованные подострые и 90-дневные эксперименты *in vivo* подтверждают, что:

- генотоксические и промоторные эффекты 2-ACB регистрируются преимущественно при очень высоких дозах, несопоставимых с диетарным поступлением;
- подострые и 90-дневные исследования (2-DCB и 2-tDCB) демонстрируют отсутствие системной токсичности и промоции опухолей при дозах, многократно превышающих возможное реальное потребление;
- современные оценки риска (EFSA, Health Canada и др.), учитывающие эти данные, рассматривают 2-ACB пре-

имущественно как специфические маркёры облучения жиро содержащих продуктов, а не как лимитирующий фактор безопасности при соблюдении регламентированных доз облучения.

Радиолиз углеводов и витамина С: фураны, НМФ и акриламид. Экспериментальные работы по радиолизу водных растворов сахаров и витамина С показали образование органических кислот, фурановых производных и других низкомолекулярных соединений [13]. Значительная часть этих продуктов идентична соединениям, возникающим при термической обработке.

Особое внимание уделяется фурану и акриламиду как возможным канцерогенам, присутствующим в термообработанных продуктах (кофе, жареный картофель, хлеб, кондитерские изделия). В исследовании X. Fan и K. Mastovska показано, что:

- в водных растворах ионизирующее излучение при дозах 1–3 кГр практически полностью разрушает фуран и акриламид;
- в реальных продуктах (сосиски, детское пюре из сладкого картофеля) дозы 2,5–3,5 кГр, достаточные для 5-log-редукции патогенов, снижали уровни фурана примерно на 25–40%;
- новый акриламид при облучении не образовался, а исходный частично разлагался, главным образом в водных системах [10].

Обзор исследований акриламида подтверждает, что ионизирующее излучение может рассматриваться как одна из технологических стратегий снижения содержания акриламида в некоторых водных системах (соусах, растворах), но не является универсальным методом для жирных и крахмалистых матриц [10].

Таким образом, в отношении фурана и акриламида радиационная обработка скорее уменьшает, чем увеличивает экспозицию потребителя, особенно если облучение применяется после термообработки.

Общие продукты радиолиза белков, жиров и витаминов.

Обзоры исследований в области радиационной химии пищевых компонентов показывают, что:

- в белках радиолиз приводит к образованию карбонильных производных, сшивок, окислению серосодержащих аминокислот;
- в жирах – к образованию первичных гидропероксидов, вторичных продуктов (альдегиды, кетоны, малоновый диальдегид);
- из витаминов наибольшую чувствительность проявляют витамин С и тиамин; жирорастворимые витамины (A, D, E, K) более устойчивы [4, 5].

Масштаб этих изменений при дозах до 10 кГр сопоставим или ниже, чем при длительном хранении и кулинарной обработке (варка, пастеризация, стерилизация).

В экспериментах с использованием мяса, птицы и рыбы установлено, что при дозах 1–5 кГр повышение содержания белковых карбонилов статистически значимо, но по величине сопоставимо с изменениями при хранении в условиях охлаждения и воздействия света [22, 23]. Существенных изменений аминокислотного состава и показателей белковой ценности не выявлено даже при облучении консервированных продуктов высокими стерилизующими дозами, что отражено в обзорах JECFI и EFSA [24]. Комплексные обзоры исследований с облучением мяса подчёркивают, что при дозах до 10 кГр структурные и функциональные изменения белков технологически и нутритивно допустимы и обычно менее выражены, чем при традиционной тепловой обработке [22, 23].

С токсикологической точки зрения продукты белкового радиолиза (ортотиозин, карбонильные производные, сшивки) рассматриваются преимущественно как маркёры окислительного стресса, а не как самостоятельные критические токсиканты. В длительных диетарных опытах с полностью облучёнными рационаами не получено данных о специфических эффектах, связанных именно с продуктами радиолиза белков.

Многочисленные долговременные и многопоколенные эксперименты на крысах, мышах, собаках и птицах с ис-

пользованием рационов со значительным удельным весом облучённого мяса, рыбы, овощей, а также лабораторных диет не выявили тератогенных, мутагенных или канцерогенных эффектов и выраженных нарушений репродуктивной функции, роста, развития или гистопатологии органов, что отражено в обобщающих оценках JECFI/WHO и европейских экспертных комитетов [24–27].

По данным совместных экспертных оценок ФАО/ВОЗ/МАГАТЭ и EFSA, основанных на многолетних токсикологических исследованиях и опыте длительного потребления облучённой продукции различными популяциями, не получено свидетельств повышения риска рака, врождённых пороков развития или нарушений репродуктивной функции при длительном употреблении облучённой пищи [2, 3, 24]. Масштабная коммерческая обработка специй и сухих овощных приправ ионизирующим излучением во многих странах (США, государства ЕС, Бразилия, Китай, Республика Корея, ЮАР и др.) – сотни тысяч тонн продукции на рынке с 1970–1980-х годов – не сопровождалась регистрацией специфических неблагоприятных последствий для здоровья населения [28–30]. Дополнительный опыт получен при длительном использовании облучённых продуктов в питании космонавтов и иммунокомпрометированных пациентов. Негативных эффектов, выходящих за пределы ожидаемых колебаний фоновой патологии, не обнаружено [31, 32].

Исследования продуктов радиолиза и безопасности облучённой пищи, выполненные российскими учёными

Формирование отечественной доказательной базы по безопасности облучённых пищевых продуктов началось ещё в 1950–1960-е годы. Было показано, что при дозах, обеспечивающих микробиологический эффект, химические изменения (окисление липидов, частичная денатурация белка) сопоставимы с наблюдаемыми при традиционной тепловой обработке и хранении, а облучённые продукты не вызывают неблагоприятных изменений здоровья обследованных людей [33]. В дальнейшем эти выводы были подтверждены практикой отечественной радиационной химии и гигиены питания. Обзоры, отражающие влияние ионизирующего излучения на пищевые продукты (Л.К. Петриченко, А.К. Пикаев и др.), показали, что радиолиз липидов и белков в пищевой матрице приводит к образованию свободных радикалов, перекисных соединений, альдегидов и кетонов, по своему характеру не отличающихся от продуктов окисления жиров при жарке, стерилизации и длительном хранении [34, 35]. При технологически обоснованных дозах (как правило, до 3–5 кГр для радиурезии и до 10 кГр для радиаптеризации) концентрации этих соединений остаются в диапазоне, сопоставимом с традиционными способами консервирования, и не свидетельствуют о формировании специфической радиоиндированной химической опасности.

На современном этапе российские исследования в значительной мере охватывают мясо и мясные продукты. В ряде работ (А.А. Семёнова и соавт.) изучено образование продуктов радиолиза в мясном фарше и кусковом мясе в зависимости от поглощённой дозы γ -излучения и условий хранения [36, 37]. Показано, что при дозе $\approx 0,5$ кГр специфические продукты радиолиза практически не детектируются используемыми методами, при повышении дозы до 2–3 кГр отмечается рост ТБК-активных соединений и других маркёров перекисного окисления липидов, однако их значения соответствуют уровню окисления жиров в процессе обычного холодильного хранения. Одновременно фиксируется выраженное снижение общей микробной обсеменённости и увеличение сроков годности продукции, что в совокупности трактуется как положительный баланс «химический риск – микробиологический выигрыш» при соблюдении режимов облучения.

Особое место занимает использование метода электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) для оценки и индикации продуктов радиолиза. Работы Р.Т. Тимаковой и соавт.

показали, что в костной ткани облучённого мяса и рыбы формируются устойчивые радиационно-индуцированные радикалы, параметры ЭПР-спектра которых (g -фактор, амплитуда, площадь сигнала) зависят от вида животного, дозы и условий хранения [38, 39]. Эти радикальные центры рассматриваются как физический маркер факта обработки и глубины радиолиза твёрдой фазы, однако их наличие в используемых диапазонах доз не сопряжено с выявляемыми токсическими эффектами и служит преимущественно для идентификации облучённой продукции и контроля технологических режимов.

Отечественные исследования подтверждают, что в жироодержащих продуктах животного происхождения (говядина, свинина, баранина, мясо диких животных) с ростом дозы облучения на уровне верхней границы технологического коридора (6–10 кГр) усиливаются свободнорадикальные процессы и снижается антиоксидантная активность тканей, однако эти изменения остаются в пределах адаптационного диапазона и по своим величинам сопоставимы с окислительными процессами при интенсивной тепловой обработке. Данные экспериментов на животных и *in vitro* не выявили специфических «радиотоксинов», обладающих большей токсичностью, чем комбинация уже известных продуктов перекисного окисления липидов.

Значительный вклад в исследование продуктов радиолиза внесли работы Ф.Р. Вафина и соавт., изучавших расщительное сырьё и зерно: учёными разработаны подходы к индикации продуктов радиолиза в облучённом зерне с использованием реакции бентонитовой флоккуляции [40]. Показано, что при увеличении дозы γ -облучения ячменя возрастает концентрация хиноидных радиотоксинов, которые могут выступать как разобщители окислительного фосфорилирования при высоких уровнях накопления. На практике же при дозах, пригодных для пищевых и кормовых технологий, их содержание остаётся ниже порогов, ассоциированных с неблагоприятными биологическими эффектами, и используется прежде всего как аналитический индикатор режима обработки.

Параллельно развиваются работы по радиолизу микропримесей и биоактивных компонентов. В радиационно-химических исследованиях Т.В. Мельниковой показано, что облучение растворов и пищевых матриц, содержащих устойчивые хлорорганические пестициды, приводит к частичному разложению исходных ксенобиотиков. Образующиеся продукты трансформации не демонстрируют большей токсичности по сравнению с исходными соединениями в пределах технологических доз [41, 42]. В модельных системах с антицианами (А.А. Суворова и соавт.) продемонстрировано, как радиолиз воды, металлокомплексы и ионы железа влияют на устойчивость растительных пигментов и антиоксидантных свойств; эти данные важны для прогнозирования изменений цвета и антиоксидантного потенциала облучённых соков, вин и растительного сырья [43].

К специфическим низкомолекулярным продуктам радиолиза, получившим нормативное закрепление в России, относятся 2-алкилцикlobутаноны (2-ACB), образующиеся в следовых количествах при облучении жироодержащих продуктов. В отечественных обзорах (О.Н. Мусина, К.Л. Коновалов и др.) обобщены международные и российские данные о 2-додецил- и 2-тетрадецилцикlobутаноне как маркёрах обработки. Подчёркивается, что уровни их содержания в продуктах при дозах до 10 кГр на порядки ниже доз, при которых в экспериментальных моделях регистрировались потенциально неблагоприятные эффекты [44, 45].

В последние годы активно развиваются высокочувствительные методы индикации продуктов радиолиза. З.Р. Камалова и соавт. предложили иммунологическую тест-систему на основе малослойных графенов для обнаружения специфических продуктов радиолиза в облучённом мясе. Такая платформа позволяет регистрировать целевые молекулы при низких концентрациях и может использоваться для контроля соблюдения режимов облучения и подтверждения факта обработки [46].

Российские авторы в современных обзорах и аналитических исследованиях систематизируют международный и национальный опыт применения радиационных технологий обработки продовольственного сырья, уделяют особое внимание химическим изменениям и токсикологической оценке продуктов радиолиза. Подчёркивается, что при соблюдении регламентированных доз и технологических параметров радиационная обработка не формирует нового критического химического фактора риска по сравнению с традиционными технологиями консервирования. Продукты радиолиза по своему спектру и уровням укладываются в диапазон вариабельности, характерный для термически обработанной и длительно хранившейся пищи, а основное значение исследований в этой области заключается в развитии методов идентификации, прослеживаемости и обосновании национальных нормативных документов по облучённой продукции [47–49].

В совокупности исследования российских авторов подтверждают, что:

- спектр продуктов радиолиза в отечественных экспериментальных моделях соответствует данным зарубежных работ;
- уровни образующихся соединений при регламентированных дозах облучения не превышают диапазона, характерного для термической обработки и хранения;
- результаты токсикологических и гигиенических исследований не выявляют специфических неблагоприятных эффектов, связанных именно с продуктами радиолиза, что согласуется с международной оценкой безопасности облучённой пищи.

Международное регулирование облучённых продуктов и роль продуктов радиолиза

В международной практике продукты радиолиза не рассматриваются как самостоятельный объект количественного нормирования. Регулирование ориентировано на установление максимально допустимых доз облучения для различных категорий продуктов, определение перечней разрешённой к облучению продукции, требования к маркировке и прослеживаемости, обеспечение надлежащей производственной практики и дозиметрического контроля.

Европейский союз. В ЕС облучение пищевых продуктов регулируется директивами 1999/2/ЕС и 1999/3/ЕС. На уровне ЕС разрешено облучение сушёных ароматических трав, специй и овощных приправ при средней дозе до 10 кГр. Государства-члены могут дополнительно разрешать облучение других продуктов на национальном уровне. EFSA в 2011 г. подтвердило безопасность технологии при соблюдении установленных условий и не рекомендовало вводить ПДУ для отдельных продуктов радиолиза [2].

США и Канада. В США облучение пищевых продуктов регулируется Управлением по контролю качества пищевых продуктов и лекарственных средств (FDA) (21 CFR Part 179). Для каждой категории продукции (специи, мясо, птица, фрукты, овощи и др.) установлены максимально допустимые дозы; отдельные ПДУ для 2-ACB, фурана или других радиолитических соединений не предусмотрены, поскольку их токсикологическая значимость при реальных уровнях экспозиции признана низкой. Сходный подход реализован в Канаде, где облучение рассматривается как одна из стандартных технологий обеспечения безопасности и долговечности продуктов, а контроль направлен на соблюдение доз, маркировки и качества процесса [17].

Страны Азии, Латинской Америки, Африки и Ближнего Востока. В ряде азиатских стран (Республике Корея, Китай, Индия, Таиланд и Вьетнам) действует достаточно широкий перечень разрешённых к облучению видов продовольственного сырья (картофель, лук, чеснок, зерновые и бобовые культуры, сухофрукты, орехи, специи и др.). Регламентация во всех этих странах строится по близкой схеме: устанавливаются перечень категорий продукции и диапазоны допустимых доз облучения, закрепляются требования

к маркировке облучённых продуктов, а специфические продукты радиолиза как отдельный химический фактор риска не нормируются. Контроль сосредоточен на соблюдении доз и корректном информировании потребителя.

В Республике Корея регулирование облучения пищевых продуктов основано на Food Sanitation Act и подзаконных актах Министерства безопасности пищевых продуктов и медикаментов (MFDS), прежде всего Food Code (Standards and Specifications for Foods – Стандарты и спецификации на пищевые продукты). В структуре Food Code выделен раздел Стандарт облучения пищевых продуктов (Food Irradiation Standard), в котором даётся определение обработки ионизирующим излучением, перечисляются виды продукции, допускаемой к облучению (картофель, лук, чеснок, зерновые, бобовые, сухие овощи, специи и др.), а также устанавливаются технологические цели (давление прорастания, защита от насекомых, снижение микробной обсеменённости) и диапазоны допустимых доз (kGy). Требования к указанию факта облучения интегрированы в общие правила маркировки (Стандарты маркировки / Пищевой кодекс – Labeling Standards / Food Code). При этом отдельные предельно допустимые уровни специфических продуктов радиолиза (2-алкилциклоутанонов, вторичных продуктов ПОЛ и др.) в корейских стандартах не предусмотрены, а безопасность обеспечивается через дозиметрический контроль и маркировку.

В Китае ключевым документом является национальный стандарт GB 14891 Irradiated Foods (Облучённые пищевые продукты), консолидировавший прежние гигиенические стандарты по отдельным группам продуктов (мясо, орехи и цукаты, сухие специи, свежие фрукты и овощи, зерно и бобы и др.). Стандарт GB 14891 определяет несколько основных категорий облучаемой продукции (злаки и бобовые, мясо и мясопродукты, рыба и морепродукты, свежие фрукты и овощи, сухие специи и обезвоженные овощи, орехи и др.) и для каждой категории устанавливает минимальную эффективную и максимальную среднюю поглощённую дозу, а также общие санитарные требования к проведению облучения и контролю. Правила маркировки облучённых продуктов закреплены в GB 7718-2011 General standard for the labelling of prepackaged foods (Общий стандарт маркировки расфасованных пищевых продуктов), где прямо указано, что на этикетке продукта, обработанного ионизирующим излучением, рядом с наименованием должно быть обозначение irradiated food, а подвергшиеся облучению ингредиенты отдельно отмечаются в перечне. Дополнительный стандарт GB 18524-2016 Hygienic specification for food irradiation processing (Гигиенические требования к обработке пищевых продуктов облучением) регламентирует гигиенические требования к процессу, оборудованию, дозиметрическому контролю и документации. При этом в китайских документах детализируются перечень продукции и дозы, но не вводятся ПДК для продуктов радиолиза; безопасность оценивается через соблюдение доз и санитарных требований, а факт обработки фиксируется в маркировке.

В Индии правовой основой служат Atomic Energy (Control of Irradiation of Food) Rules (Правила использования атомной энергии (контроль за облучением пищевых продуктов), 1996, принятые во исполнение Atomic Energy Act 1962. Они определяют понятие облучённой пищевой продукции, устанавливают, что облучение допускается только на лицензированных установках под контролем Atomic Energy Regulatory Board (Совет по регулированию атомной энергетики), содержат приложение с перечнем видов пищевых продуктов и диапазонами допустимых доз (картофель, лук, чеснок, зерновые и бобовые, специи, сухофрукты, мясо и др.). На уровне пищевого законодательства требования к облучённым продуктам интегрированы в систему стандартов FSSAI: в Food Safety and Standards (Food Products Standards and Food Additives) Regulations (Безопасность и стандарты пищевых продуктов. Стандарты на пищевые продукты и пищевые добавки. Нормативные документы),

2011 выделен раздел 2.13 Irradiation of Food (Облучение пищевых продуктов), в котором даётся определение облучённых пищевых продуктов и увязываются возможные режимы обработки с перечнем продуктов и технологическими целями, а Food Safety and Standards (Packaging and Labelling) Regulations (Правила безопасности пищевых продуктов и стандарты. Упаковка и маркировка), 2011, устанавливают специальные требования к маркировке (указание факта облучения, типа излучения, номера лицензии установки и др.). Как и в Китае, эти акты не содержат нормативов концентраций индивидуальных продуктов радиолиза. Регулирование строится вокруг перечня разрешённых продуктов, дозовых коридоров и правил маркировки.

В Таиланде регулирование основано на уведомлениях Министерства здравоохранения, в частности Notification of the Ministry of Public Health No. 297 B.E. 2549 (2006) Re: Irradiated Food и последующих актах, которые дают определения «облучённые пищевые продукты» и «облучение пищевых продуктов», устанавливают требования к производственным процессам, лицензированию и документации и предписывают обязательную маркировку облучённых продуктов с указанием факта обработки и данных оператора облучения. Во Вьетнаме регулирование базируется на решении Министерства здравоохранения Decision No. 3616/2004/QD-BYT On the issuance of the regulations on safety and sanitation of foods preserved by irradiation (О введении в действие правил безопасности и санитарии пищевых продуктов, консервированных путём облучения), устанавливающем санитарные требования к продуктам, сохранённым путём облучения (перечень классов продукции и диапазоны доз по целям обработки), и циркуляре Circular No. 76/2011/TT-BNNPTNT Министерства сельского хозяйства, который содержит подробный список разрешённых к облучению продуктов (зерно, бобовые, овощи, фрукты, орехи и др.) и максимальные поглощённые дозы для каждой позиции. В Таиланде, Вьетнаме, как и в рассмотренных выше странах, регулируются перечень продуктов, цели и дозы облучения и маркировка, тогда как ПДК для специфических продуктов радиолиза не устанавливаются. Безопасность облучённой продукции определяется соблюдением дозовых ограничений и общих санитарно-гигиенических требований.

В большинстве стран Латинской Америки, Африки и Ближнего Востока регулирование облучения пищевых продуктов строится по той же логике, что и в Азии: утверждаются перечни разрешённых к облучению продуктов и диапазоны доз, устанавливаются требования к маркировке и лицензированию установок, а специфические продукты радиолиза как отдельный химический фактор риска не нормируются. Безопасность связывается с соблюдением дозовых коридоров и общих гигиенических требований, как это предусмотрено Общим стандартом на облучённые пищевые продукты Кодекса CXS 106-1983 – Codex General Standard for Irradiated Foods (CXS 106-1983).

В Латинской Америке одним из наиболее ярких примеров регламентации считается Бразилия, где Resolução RDC nº 21/2001 Regulamento Técnico para Irradiação de Alimentos (Технический регламент облучения пищевых продуктов) разрешает облучение любых пищевых продуктов при технологически обоснованной дозе и задаёт цели обработки, требования к дозиметрии и ссылку на стандарты Codex. Более ранняя Portaria nº 9/SVS/1985 содержит детализированный перечень конкретных групп продуктов и доз.

В Аргентине иrrадиация регулируется Пищевым Кодексом Аргентины Código Alimentario Argentino, в котором статья 174 главы III, изменённая Resolución Conjunta 13-E/2017, определяет консервирование ионизирующим излучением, перечисляет классы разрешённых продуктов (мясо, рыба, фрукты и овощи, клубни, зерно и бобовые и др.) и устанавливает максимальные дозы для каждой категории. Факт обработки отражается в маркировке в общем порядке для упакованных продуктов.

В Мексике Официальный Стандарт Norma Oficial Mexicana NOM-033-SSA1-1993 устанавливал дозы для различных групп продуктов, сырья и добавок и опирался на Codex. Впоследствии этот документ был отменён, однако современный подход по-прежнему разрешает облучение как фитосанитарный метод на основе действующих норм и стандартов (например, NOM-022-SAG/FITO-2016), при этом отдельные уровни содержания продуктов радиолиза в норматив не выносятся.

В Африке показателен пример Южно-Африканской Республики: *Regulations relating to Irradiated Foodstuffs (R.1600 of 1983)* – Правила, касающиеся облучённых пищевых продуктов, принятые во исполнение документа «Продукты питания, Косметика и дезинфицирующие средства» (*Foodstuffs, Cosmetics and Disinfectants Act 54 of 1972*), определяют понятие «облучённые пищевые продукты», устанавливают требования к источникам излучения, эксплуатации установок, дозовому контролю и государственной регистрации. Последующие руководства по мониторингу описывают типичные объекты обработки (специи, сухие ингредиенты, мясо, фрукты) и схемы контроля, но не вводят специальных ПДК для продуктов радиолиза.

В Нигерии «Правила облучения пищевых продуктов» (*Food Irradiation Regulations 2021 – NAFDAC*) и Стандарт для облучённых пищевых продуктов (*DNIS 620:2010 Standard for irradiated foods*) разрешают облучение отдельных категорий продуктов при лицензировании установок и привязке к стандартам Codex, уделяя внимание дозе и маркировке, а не нормированию отдельных радиолиз-соединений.

Решения и стандарты Египетской организации по стандартизации и качеству (*Egyptian Organization for Standardization and Quality*), в том числе документы, регулирующие облучение специй, сушёного лука и чеснока, также ориентированы на перечень объектов обработки, гигиенические требования и дозовые лимиты. Специфические продукты радиолиза рассматриваются Египтом в рамках общих подходов к безопасности без установления отдельных предельно допустимых уровней.

На Ближнем Востоке для стран Совета сотрудничества арабских государств Персидского залива (GCC) действует единая система стандартов «Организация по стандартизации стран Персидского залива» (*Gulf Standardization Organization. GSO 1814:2007*). Общий стандарт для облучённых пищевых продуктов (*General standard for irradiated foods*) устанавливает общие требования к облучённым продуктам, содержит перечень допустимых объектов обработки (специи, сухие ингредиенты, фрукты, овощи и продукты животного происхождения и др.), допустимые диапазоны доз и технологические требования в логике Codex. Стандарт «Маркировка расфасованных пищевых продуктов» *GSO 9:2022 Labeling of repackaged foodstuffs* и его национальные реализации (например, UAE.S GSO 9:2017 / UAE.S 9:2019 в ОАЭ и соответствующие техрегламенты SFDA в Саудовской Аравии) уточняют, каким образом следует указывать факт облучения в маркировке, в том числе устанавливают словесное обозначение и, при необходимости, символ Radura. При этом ни GSO 1814, ни национальные акты стран Персидского залива не содержат специальных нормативов для концентраций продуктов радиолиза: контроль строится вокруг допустимых доз, перечня обрабатываемых продуктов и требований к маркировке и надзору за установками.

Япония традиционно придерживается более осторожной позиции: допускается очень ограниченный спектр облучённых продуктов, что обусловлено в большей степени социально-историческими факторами, а не наличием токсикологических оснований для запрета технологии [21].

В целом ни одна из ведущих юрисдикций не рассматривает продукты радиолиза как объект самостоятельного нормирования. Их безопасность оценивается в рамках общей концепции оценки риска облучённых продуктов [1–3, 18–24].

Методы идентификации облучённых продуктов и контроля продуктов радиолиза

Хроматографические и масс-спектрометрические методы. Для идентификации и количественного определения продуктов радиолиза широко применяются:

- газовая хроматография (ГХ) и ГХ-МС для анализа 2-АСВ, фуранов и летучих продуктов радиолиза;
- ВЭЖХ и ВЭЖХ-МС для определения органических кислот, НМФ и других неполярных соединений.

Определение 2-АСВ (прежде всего 2-ДСВ и 2-ТСВ) в жиро содержащих продуктах остаётся «золотым стандартом» химической идентификации факта облучения, особенно в комбинации с подтверждающим масс-спектрометрическим анализом [9–11].

Спектроскопические и люминесцентные методы. Спектроскопические методы включают:

- ЭПР (ESR) для регистрации стабильных свободных радикалов в костной ткани, сахаре, целлюлозе и др. (используется, в частности, для идентификации облучённого мяса на кости, рыбы, специй);
- ИК- и ЯМР-спектроскопию для исследования структурных изменений и вторичных продуктов;
- термо- и фотостимулированную люминесценцию для анализа минеральных примесей и неорганических фрагментов в пряностях, сушёных травах, чае и др. [10, 30].

Эти методы широко представлены в стандартах ЕС и международных рекомендациях как подтверждающие тесты для установления факта облучения.

Неразрушающие и мультиомные подходы. Перспективным направлением являются неразрушающие методы, прежде всего гиперспектральная визуализация в комбинации с алгоритмами машинного обучения. Анализ спектральных отпечатков поверхности плодов, овощей и других продуктов позволяет с высокой точностью различать облучённые и необлучённые образцы, не разрушая продукт [50–53].

Развиваются мультиомные подходы (метаболомика, протеомика), ориентированные на построение интегральных профилей малых молекул и белков, характерных для облучённой продукции. Такие подходы потенциально позволяют одновременно контролировать продукты радиолиза и оценивать влияние облучения на пищевую и биологическую ценность продуктов [54–57].

Перспективы исследований и практического применения

Несмотря на значительный массив накопленных данных, область радиационной обработки пищевых продуктов и изучения продуктов радиолиза сохраняет несколько ключевых направлений, требующих целенаправленного развития. Одной из приоритетных задач остаётся более глубокое изучение метаболизма отдельных специфических продуктов радиолиза, прежде всего 2-алкилциклобутанонов, в организме человека. Доступные в настоящее время токсикологические данные в целом свидетельствуют об отсутствии значимых рисков при уровнях, формирующихся в облучённых продуктах, однако вопросы биотрансформации, путей выведения, возможного участия в регуляции клеточного сигнального ответа и взаимодействия с другими компонентами рациона остаются недостаточно детализированными. Проведение современных фармакокинетических исследований, исследований омикс-уровня и моделирования *in silico* могло бы существенно повысить степень определённости в отношении долгосрочной безопасности конкретных маркеров радиолиза.

Важным вектором является анализ возможных комбинированных эффектов, если радиационная обработка сочетается с другими технологическими воздействиями (термическая обработка, сушка, копчение, использование антиоксидантов и консервантов) и с фоновым присут-

ствием химических загрязнителей в сырье. Современная повестка пищевой безопасности смещается от оценки отдельных факторов к концепции совокупной экспозиции, рассматривающей суммарное воздействие множества агентов при различных сценариях потребления. В этом контексте необходимы экспериментальные и моделирующие исследования, позволяющие оценить, каким образом радиационная обработка влияет на профили термогенных и процесс-индуцированных контаминаントов и нет ли синергизма или, напротив, компенсаторного эффекта при сочетании облучения с привычными технологическими режимами.

Отдельного внимания требует разработка быстрых, высокочувствительных и по возможности неразрушающих методов экспресс-идентификации факта облучения и уровня радиолиза на разных этапах цепи «от поля до стола». Практика показала, что физические методы (ЭПР-спектроскопия для костной ткани, термолюминесцентный анализ минеральных включений), химические подходы (определение 2-АСВ и других специфических маркёров) и новые биоаналитические технологии (иммуносенсоры, наноматериалы, графеновые платформы) обладают значительным потенциалом, но нуждаются в стандартизации, унификации процедур и интеграции в официальные системы контроля. Перспективным направлением становится создание портативных и полуавтоматизированных систем, позволяющих осуществлять проверку в местах производства, на складах и в торговых сетях без сложной пробоподготовки и дорогостоящей лабораторной инфраструктуры.

Важна комплексная оценка вклада радиационной обработки в снижение риска пищевых инфекций и образования термогенных контаминаントов, таких как фуран и акриламид, с учётом реальных потребительских практик и логистических условий. Сопоставление сценариев, при которых радиационная обработка позволяет уменьшить интенсивность теплового воздействия или отказаться от ряда химических консервантов, даёт основание рассматривать эту технологию как инструмент оптимизации профиля риска продукта. Для обоснования таких решений необходимы эпидемиологически и технологически ориентированные исследования, связывающие данные о дозах облучения, микробиологической эффективности, изменениях химического состава и фактических схемах транспортировки и хранения.

Заключение

Продукты радиолиза в облучённых пищевых продуктах – важный, но хорошо изученный элемент общей картины химических изменений, сопровождающих применение ионизирующего излучения. Современный массив экспериментальных, клинических и регуляторных данных показывает, что спектр образующихся соединений (органические кислоты, альдегиды, кетоны, фураны, 2-алкилциклобутаноны, модифицированные аминокислоты и др.) в облучённых продуктах в целом совпадает с продуктами старения и термической обработки, а их уровни, как правило, сопоставимы или ниже формирующихся при традиционных технологиях.

2-алкилциклобутаноны выступают специфичными маркёрами облучения жиров и при высоких дозах в экспериментальных моделях демонстрируют генотоксический и промоторный потенциал, однако при реальных диетарных уровнях экспозиции риск для здоровья человека оценивается как крайне низкий. Фуран и акриламид преимущественно связаны с высокотемпературной обработкой. Ионизирующее излучение не увеличивает их содержания и в ряде случаев способствует частичному разрушению уже образовавшихся количеств, особенно в водных системах.

Результаты многопоколенных, подострых и хронических исследований *in vivo*, клинических наблюдений и эпидемиологических исследований не выявили специфических токсикологических эффектов, ассоциированных с потреблением облучённой пищи при соблюдении действующих регламентов.

Международные и национальные регуляторы (FAO/WHO/IAEA, EFSA, FDA и др.) констатируют, что облучение пищевых продуктов при дозах до 10 кГр не создаёт дополнительно химического риска для потребителя. Регулирование сосредоточено на контроле доз, перечня продукции и маркировки, а не на установлении предельно допустимых уровней для отдельных продуктов радиолиза. Однако современные методы аналитического контроля позволяют надёжно идентифицировать факт облучения и при необходимости количественно оценивать содержание ключевых продуктов радиолиза, что формирует основу для научно обоснованного надзора и дальнейшей оптимизации технологии. В совокупности эти данные подтверждают, что при соблюдении международно признанных норм и принципов надлежащей производственной практики радиационная обработка является безопасным инструментом обеспечения качества и безопасности пищевой продукции, а продукты радиолиза не формируют нового критического фактора риска для здоровья населения.

Литература

(п.п. 1–32, 50–57 см. References)

33. Бондарев Г.И. Облученные ионизирующей радиацией пищевые продукты и их пригодность для питания людей. *Гигиена труда и профессиональные заболевания*. 1960; (3): 92–6.
34. Петриченко Л.К., Васильева А.Г. Влияние ионизирующих излучений на продукты питания. *Известия вузов. Пищевая технология*. 2004; (1): 95–8. <https://elibrary.ru/qakgnt>
35. Пикаев А.К. *Современная радиационная химия: Основные положения. Экспериментальная техника и методы*. М.: Наука; 1985.
36. Семёнова А.А., Дыдыкин А.С., Горбунова Н.А., Дроздова Н.А. Изучение образования в мясе продуктов радиолиза в зависимости от поглощённой дозы γ-излучения и её влияние на окисление жиров и микробиологические показатели. *Радиация и риск (бюллетень национального радиационно-эпидемиологического регистра)*. 2020; 29(1): 32–44. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2020-29-1-32-44> <https://elibrary.ru/lziby>
37. Семёнова А.А., Дыдыкин А.С., Асланова М.А., Беро А.Л. Применение ионизирующего излучения в мясной промышленности. *Всё о мясе*. 2019; (24): 30–4. <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2019-4-30-34> <https://elibrary.ru/pbfjrz>
38. Тимакова Р.Т. Оценка радиационной безопасности охлаждённого мяса с использованием метода электронного парамагнитного резонанса. *Теория и практика переработки мяса*. 2016; 1(3): 59–60. <https://doi.org/10.21323/2414-438X-2016-1-3-57-65> <https://elibrary.ru/xagdtr>
39. Тимакова Р.Т. Применение радиационных технологий и идентификация облучённого мяса птицы. *Индустрия питания*. 2018; 3(2): 49–54. <https://elibrary.ru/utsvkq>
40. Вафин Ф.Р., Гайнуллин Р.Р., Калимуллин Ф.Х., Нефедова Р.В., Идрисов А.М., Курбангаев Я.М. и др. Индикация продуктов радиолиза в облучённом зерне с помощью реакции бентонитовой флоккуляции. *Ветеринарный врач*. 2021; (2): 12–5. <https://elibrary.ru/foicus>
41. Мельникова Т.В., Полякова Л.П., Козьмин Г.В. Исследование стабильности модельных растворов хлорогеновых пестицидов под влиянием гамма-излучения. *Радиационная биология и радиоэкология*. 2001; 41(6): 683–7.
42. Мельникова Т.В., Полякова Л.П., Удалова А.А. Оценка биологической активности радиационных метаболитов различных хлорогеновых пестицидов. *Журнал Белорусского государственного университета. Серия 2. Химия*. 2017; (4): 27–32. <https://elibrary.ru/yrwzgh>
43. Суторова А.А., Фенин А.А., Ревина А.А. Влияние ионов железа на радиационно-химические превращения антибиотиков в водно-спиртовой системе. *Успехи в химии и химической технологии*. 2008; 22(7): 108–11. <https://elibrary.ru/qzvpgb>
44. Мусина О.Н., Коновалов К.Л. Радиационная обработка ионизирующими излучением продовольственного сырья и пищевых продуктов. *Пищевая промышленность*. 2016; (8): 46–9. <https://elibrary.ru/wmqwox>

45. Павлов Ю.С., Петров А.Н., Тришакарева М.В., Федянина Н.И., Мищурин Н.П., Неменущая Л.А. *Радиационные методы в переработке сельскохозяйственных культур: научный аналитический обзор*. М.; 2019. https://elibrary.ru/jpnfek
46. Камалова З.Р. Индикация продуктов радиолиза в облучённом мясе с помощью иммунологической тест-системы на основе малослойных графенов. Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана. 2024; 260(4): 119–24.
47. Рождественская Л.Н., Коробейников М.В., Брязгин А.А. Предпосылки и основания использования ионизирующего излучения для

- обработки пищевой продукции. *Пищевая промышленность*. 2016; (11): 39–45. https://elibrary.ru/xbsorb
48. Кузьмин С.В., Русаков В.Н., Есаулова О.В. Безопасность пищевых продуктов, подвергнутых обработке ионизирующими излучениями (обзор литературы). *Гигиена и санитария*. 2025; 69(1): 60–4. https://doi.org/10.47470/0044-197X-2025-69-1-60-64 https://elibrary.ru/fdqiosc
49. Кузьмин С.В., Русаков В.Н., Есаулова О.В. Актуальные проблемы радиационного облучения пищевой продукции в Российской Федерации. В кн.: *Эрисмановские чтения. Новое в нутрициологии и гигиене питания для обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения РФ: Материалы конгресса*. М.; 2023: 215–23.

References

1. WHO. Wholesomeness of irradiated food. Report of a joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee. World Health Organization Technical Report Series 659. Geneva; 1981.
2. EFSA Panel on Food Contact Materials, Enzymes, Flavourings and Processing Aids (CEF). Scientific opinion on the chemical safety of irradiation of food. *EFSA J*. 2011; 9(4): 1930.
3. EFSA. Statement summarising the conclusions and recommendations from the opinions on the safety of irradiation of food. *EFSA J*. 2011; 9(4): 2107.
4. Fan X. Radiation chemistry of food components. In: Sommers C.H., Fan X., eds. *Food Irradiation Research and Technology*. Ames: Wiley-Blackwell; 2012: 23–52.
5. Sommers C.H. Toxicological safety of irradiated foods. In: Sommers C.H., Fan X., eds. *Food Irradiation Research and Technology*. Ames: Wiley-Blackwell; 2012: 153–78.
6. Song B.S., Lee J.W., Kim J.K., Choi S.J., Park J.H., Marchioni E., et al. A critical review on toxicological safety of 2-alkylcyclobutanones in irradiated foods. *Radiat. Phys. Chem.* 2014; 103: 188–96. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2014.05.065
7. Gadgil P., Hachmeister K.A., Smith J.S., Kropp D.H. 2-alkylcyclobutanones as irradiation dose indicators in irradiated ground beef patties. *J. Agric. Food Chem.* 2002; 50(20): 5746–50. https://doi.org/10.1021/jf020323+
8. Swallow A.J. Wholesomeness and safety of irradiated foods. In: *Food Irradiation*. Springer; 1991: 73–98.
9. Ramírez-Cahero H.F., Valdivia-López M.A. Effect of gamma radiation on sugars and vitamin C: Radiolytic pathways. *Food Chem.* 2018; 245: 1131–40. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.057
10. Fan X., Mastovska K. Effectiveness of ionizing radiation in reducing furan and acrylamide levels in foods. *J. Agric. Food Chem.* 2006; 54(21): 8266–70. https://doi.org/10.1021/jf061151+
11. Claeys W.L. Occurrence, toxicology and strategies for reducing acrylamide levels in foods. *Food Additives and Contaminants*. 2016; 33(11): 163–80.
12. Song B.S. Subchronic oral toxicity of 2-dodecylcyclobutanone in rats. *Food Chem. Toxicol.* 2018; 118: xxx–xxx.
13. Raul F., Gosse F., Delincee H., Hartwig A., Marchioni E., Miesch M., et al. Food-borne radiolytic compounds (2-alkylcyclobutanones) may promote experimental colon carcinogenesis. *Nutr. Cancer*. 2002; 44(2): 189–91. https://doi.org/10.1207/S15327914NC4402_11
14. Marchioni E., Raul F., Burnouf D.Y., Miesch M., Delincee H., Hartwig A., et al. Toxicological study on 2-alkylcyclobutanones – results of a collaborative study. *Radiat. Phys. Chem.* 2004; 71(1): 145–50. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2004.05.042
15. Delincée H. Analytical methods to identify irradiated food – a review. *Radiat. Phys. Chem.* 2002; 63(3–6): 455–8.
16. Health Canada. Evaluation of the Significance of 2-Dodecylcyclobutanone and Other Alkylcyclobutanones. Food Directorate, Health Products and Food Branch. Ottawa; 2010.
17. Roberts P.B. Food irradiation is safe: Half a century of studies. *Radiat. Phys. Chem.* 2014; 105: 78–82. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2014.05.016
18. Ravindran R., Jaiswal A.K. Wholesomeness and safety aspects of irradiated foods. *Food Chem.* 2019; 285: 363–8. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.02.002
19. Sato M., Todoriki S., Takahashi T., Hafez E., Takasu C., Uehara H., et al. Modifications of azoxymethane-induced carcinogenesis and 90-day oral toxicities of 2-tetradecylcyclobutanone as a radiolytic product of stearic acid in F344 rats. *J. Toxicol. Pathol.* 2015; 28(2): 99–107. https://doi.org/10.1293/tox.2015-0002
20. Hijaz F., Shrestha T.B., Bossman S.H., Hussain F., Smith J.S. In vitro and in vivo metabolism of the radiolytic compound 2-dodecylcyclobutanone. *J. Food Sci.* 2010; 75(4): T72–80. https://doi.org/10.1111/j.1750-3844.2010.01600.x
21. Martins R., Vieira D.P., de Carvalho L.R., Barbezan A.B., Villavicencio A.L.C.H. In vivo genotoxicity of 2-alkylcyclobutanones in liver cells from rats exposed to irradiated cocoa butter using flow cytometry. *Braz. J. Radiat. Sci.* 2021; 9(1A): 1–15. https://doi.org/10.15392/bjrs.v9i1A.1534
22. Kim Y.J., Cha J.Y., Lee J.H., Jung S., Choi Y.S. The effect of irradiation on meat products. *Food Sci. Anim. Resour.* 2024; 44(4): 779–89. https://doi.org/10.5851/kosfa.2024.e35
23. Indiaro R., Irawan A.N., Subroto E. meat irradiation: a comprehensive review of its impact on food quality and safety. *Foods*. 2023; 12(9): 1845. https://doi.org/10.3390/foods12091845
24. WHO. High-dose irradiation: wholesomeness of food irradiated with doses above 10 kGy. Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Study Group. WHO Technical Report Series № 890; 1999.
25. Van Petten L.E., Calkins J.E., McConnell R.F., Gottschalk H.M., Elias P.S. Long-term feeding studies in mice fed a diet containing irradiated fish. I. Multigeneration reproduction, mutagenicity, teratology, and longevity studies. *Toxicol. Lett.* 1980; 7(2): 97–101. https://doi.org/10.1016/0378-4274(80)90039-9
26. Poling C.E., Warner W.D., Humber F.R. Growth, reproduction, survival and histopathology of rats fed beef irradiated with electrons. *J. Food Sci.* 1955; 20(3): 193–214.
27. Larson P.S. Long-term dog feeding tests on irradiated green beans and fruit compote. Virginia; 1958.
28. ICGFI / IAEA. Food irradiation – A series of Fact Sheets from the International Consultative Group on Food Irradiation. Facts about. Cristina Sofronie: Conference; 2021. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16747.05925
29. Kume T., Furuta M., Todoriki S., Uenoyama N., Kobayashi Y. Quantity and economic scale of food irradiation in the world. *Radioisotopes*. 2009; 58(1): 25–32. https://doi.org/10.3769/radioisotopes.58.25
30. Loaharanu P., Ahmed M., eds. *Irradiated Foods*. American Council on Science and Health; 2003/2007.
31. Käferstein F.K., Moy G.G. Public health aspects of food irradiation. *J. Public Health Policy*. 1993; 14(2): 149–63.
32. Prejean J. *Food Irradiation*. Harvard Law School; 2001.
33. Bondarev G.I. Food products exposed to ionizing radiation and their suitability for human nutrition. *Gigiena truda i professional'nye zabolеваний*. 1960; (3): 92–6. (in Russian)
34. Petrichenko L.K., Vasil'eva A.G. The effect of ionizing radiation on food. *Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya*. 2004; (1): 95–8. https://elibrary.ru/qakntg (in Russian)
35. Pikaev A.K. *Modern Radiation Chemistry: Basic Principles. Experimental Techniques and Methods [Современная радиационная химия: Основные положения. Экспериментальная техника и методы]*. Moscow: Nauka; 1985. (in Russian)
36. Semenova A.A., Dydykin A.S., Gorbunova N.A., Drozdova N.A. Effect of g-radiation dose on quality and microbiological safety of meat during postradiation storage. *Radiatsiya i risk (byulleten' natsional'nogo radiatsionno-epidemiologicheskogo registra)*. 2020; 29(1): 32–44. https://doi.org/10.21870/0131-3878-2020-29-1-32-44 https://elibrary.ru/lziby (in Russian)
37. Semenova A.A., Dydykin A.S., Aslanova M.A., Bero A.L. The use of the ionizing radiation in the meat industry. *Vse o myase*. 2019; 2(4): 30–4. https://doi.org/10.21323/2071-2499-2019-4-30-34 https://elibrary.ru/pbfzr (in Russian)
38. Timakova R.T., Tikhonov S.L., Tarakov A.N., Kudryashov I.S. Assessment of radiation safety of chilled meat using the method of electron paramagnetic resonance. *Teoriya i praktika pererabotki myasa*. 2016; 1(3): 59–60. https://doi.org/10.21323/2414-438X-2016-1-3-57-65 https://elibrary.ru/xagdur (in Russian)
39. Timakova R.T. Radiotechnology appliance and identification of the irradiate poultry meat. *Industriya pitaniya*. 2018; 3(2): 49–54. https://elibrary.ru/utsvkq (in Russian)
40. Vafin F.R., Gajnullin R.R., Khalimullin F.K., Nefedova R.V., Idrisov A.M., Kurbangaleev Y.M., et al. Indication of radiolysis products in irradiated grain using the bentonite flocculation reaction. *Veterinarnyi vrach*. 2021; (2): 12–5. https://elibrary.ru/quoycg (in Russian)
41. Melnikova T.V., Polyakova L.P., Koz'min G.V. Stability study of model solutions of organochlorine pesticides under the influence of gamma radiation. *Radiatsionnaya biologiya i radioekologiya*. 2001; 41(6): 683–7. (in Russian)
42. Melnikova T.V., Polyakova L.P., Oudalova A.A. Biological activity estimation of radiation metabolites of different organochlorinated pesticides. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 2. Khimiya*. 2017; (4): 27–32. https://elibrary.ru/yrwzh (in Russian)
43. Suvorova A.A., Fenin A.A., Revina A.A. The effect of iron ions on radiation-chemical transformations of anthocyanins in an aqueous alcohol system. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2008; 22(7): 108–11. https://elibrary.ru/qzvpgb (in Russian)
44. Musina O.N., Konovalov K.L. Food raw materials and food products radiation treatment. *Pishchevaya promyshlennost'*. 2016; (8): 46–9. https://elibrary.ru/wmqwox (in Russian)
45. Pavlov Yu.S., Petrov A.N., Trishkareva M.V., Fedyanina N.I., Mishurov N.P., Nemenuchshaya L.A. *Radiation methods in crop processing: a scientific analytical review [Radiatsionnye metody v pererabotke sel'skokhozyaistvennykh kul'tur: nauchnyi analiticheskii obzor]*. Moscow: Rosinformagrotech, 2019. https://elibrary.ru/jpnfek (in Russian)
46. Kamalova Z.R. Indication of radiolysis products in irradiated meat using an immunological test system based on multilayer graphenes. *Uchenye zapiski Kazanskoi gosudarstvennoi akademii veterinarnoi meditsiny im. N.E. Baumana*. 2024; 260(4): 119–24. (in Russian)
47. Rozhdestvenskaya L.N., Korobeynikov M.V., Bryazgin A.A. Background and grounds of using of ionizing radiation for the treatment of food products. *Pishchevaya promyshlennost'*. 2016; (11): 39–45. https://elibrary.ru/xbsorb (in Russian)

48. Kuzmin S.V., Rusakov V.N., Esaulova O.V., Setko A.G. Safety of food products treated with ionizing radiation (literature review). *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2025; 69(1): 60–4. <https://doi.org/10.47470/0044-197X-2025-69-1-60-64> <https://elibrary.ru/fdqjoc> (in Russian)
49. Kuzmin S.V., Rusakov V.N., Esaulova O.V. Actual problems of radiation exposure of food products in the Russian Federation. In: *Erisman Readings. New Developments in Nutrition and Food Hygiene to Ensure the Sanitary and Epidemiological Well-Being of the Population of the Russian Federation. Materials of the Congress [Erismanovskie chteniya. Novoe v nutritsiologii i gигиене питаниya dlya obespecheniya sanitarno-epidemiologicheskogo blagopoluchiya naseleniya RF: Materialy kongressa]*. Moscow; 2023; 215–23. (in Russian)
50. Nada H.M., Omer O.A., Esmaiel H.A.H., Arafa A.A., Ashour M. Identification of irradiated food through hyperspectral imaging assisted by deep learning techniques. In: *Multimedia Tools and Applications*. 2025. <https://doi.org/10.1007/s11042-025-21104-6>
51. Nada H.M., Omer O.A., Esmaiel H.A.H., Ashour M., Arafa A.A. Deep learning networks for non-destructive detection of food irradiation. *Revue d'Intelligence Artificielle*. 2023; 37(3): 551–5.
52. Gul N., Muzaffar K., Shah S.Z.A., Assad A., Makroo H.A., Dar B.N. Deep learning hyperspectral imaging: a rapid and reliable alternative to conventional techniques in the testing of food quality and safety. *Qual. Assur. Saf. Crops Foods*. 2024; 16(1): 78–97. <https://doi.org/10.15586/qas.v16i1.1392>
53. Ryu J., Hong S.J., Park S., Kim E., Lee C.H., Kim S., et al. Nondestructive freshness evaluation of mackerel fish using Vis/NIR hyperspectral imaging and multivariate analysis. *J. Food Eng.* 2024; 377: 112086. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112086>
54. Panseri S., Arioli F., Pavlovic R., Di Cesare F., Nobile M., Mosconi G., et al. Impact of irradiation on metabolomics profile of ground meat and its implications toward food safety. *LWT – Food Sci. Technol.* 2022; 161: 113305. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113305>
55. Zanardi E., Caligiani A., Palla L., Mariani M., Ghidini S., Di Ciccio P.A., et al. Metabolic profiling by ¹H NMR of ground beef irradiated at different irradiation doses. *Meat Sci.* 2015; 103: 83–9. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.01.005>
56. Stefanova R., Vasilev N.V., Vassilev N.G. ¹H-NMR spectroscopy as an alternative tool for the detection of gamma-ray irradiated meat. *Food Anal. Methods*. 2011; 4: 399–403.
57. Zhang J., Wang T., Yang C., Wu R., Xi L., Ding W. Integrated proteomics and metabolomics analysis revealed the mechanisms underlying the effect of irradiation on the fat quality of Chinese bacon. *Food Chem.* 2023; 413: 135385. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135385>

Сведения об авторах

Кузьмин Сергей Владимирович, доктор мед. наук, профессор, директор ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Мытищи, Россия. E-mail: Kuzmin.sv@fnccg.ru

Русаков Владимир Николаевич, канд. мед. наук, вед. науч. сотр. отд. гигиены питания ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Мытищи, Россия. E-mail: vladrus2005@gmail.com

Information about the authors

Sergey V. Kuzmin, DSc (Medicine), professor, director, Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishchi, 141014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-0209-9732> E-mail: Kuzmin.sv@fnccg.ru

Vladimir N. Rusakov, PhD (Medicine), leading researcher, Department of food hygiene, Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishchi, 141014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-9514-9921> E-mail: vladrus2005@gmail.com