

Читать  
онлайн  
Read  
online

Кузьмин С.В., Русаков В.Н., Есаулова О.В. Сетко А.Г.

## Безопасность пищевых продуктов, подвергнутых обработке ионизирующим излучением (обзор литературы)

ФБУН «Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 141014, Мытищи, Россия

### РЕЗЮМЕ

Облучение пищевых продуктов ионизирующим излучением (ОИИ) — это перспективное направление в пищевой промышленности, которое активно развивается и применяется в различных странах. ОИИ позволяет эффективно бороться с опасными патогенами, предотвращать порчу пищевых продуктов и продлевать срок их годности. ОИИ пищевых продуктов одобрено Продовольственной и сельскохозяйственной организацией Объединённых Наций, Всемирной организацией здравоохранения и Кодексом Алиментариус как безопасный метод сохранения продуктов. В России разрешено облучение нескольких категорий продуктов питания. В связи с этим остро встают вопросы безопасности для потребителей таких продуктов. Проведён анализ научных исследований, касающихся безопасности пищевых продуктов, подвергшихся ОИИ, с использованием информационных порталов eLIBRARY.RU, Всемирной организации здравоохранения, Международного агентства по атомной энергии, Science Direct, PubMed и Scopus. ОИИ приводит к радиационным, микробиологическим и химическим изменениям в продуктах питания, но их безопасность сопоставима с безопасностью продуктов, обработанных другими традиционными методами: нагрев, пастеризация и консервирование. ОИИ пищевых продуктов не приводит к их радиоактивности. Согласно Кодексу Алиментариус максимальная поглощённая доза при облучении не должна превышать 10 кГр. Облучение жиросодержащей пищи приводит к образованию 2-алкилциклобутанов (2-АЦБ). Цитотоксические и генотоксические эффекты 2-АЦБ подтверждены в исследованиях, но только в случае высоких концентраций этих соединений. В продуктах, облучённых дозами до 59 кГр, 2-АЦБ образуются в низких концентрациях, следовательно, ОИИ пищевых продуктов также не приводит к мутагенным или генотоксическим эффектам. Данные исследований подтверждают отсутствие радиационных, микробиологических и токсикологических рисков при соблюдении рекомендованных доз и режимов.

**Ключевые слова:** облучение пищевых продуктов; безопасность; ионизирующее излучение; пищевая безопасность; обзор

**Для цитирования:** Кузьмин С.В., Русаков В.Н., Есаулова О.В. Сетко А.Г. Безопасность пищевых продуктов, подвергнутых обработке ионизирующим излучением (обзор литературы). *Здравоохранение Российской Федерации*. 2025; 69(1): 60–64. <https://doi.org/10.47470/0044-197X-2025-69-1-60-64> <https://elibrary.ru/fdqjoc>

**Для корреспонденции:** Русаков Владимир Николаевич, e-mail: [rusakov.vn@fncg.ru](mailto:rusakov.vn@fncg.ru)

**Участие авторов:** Кузьмин С.В. — концепция и дизайн исследования, написание текста; Русаков В.Н. — сбор материала и обработка данных, написание текста, редактирование; Есаулова О.В. — сбор материала и обработка данных; Сетко А.Г. — написание текста, редактирование. Все авторы несут ответственность за целостность всех частей рукописи и утверждение окончательной версии рукописи.

**Финансирование.** Исследование не имело финансовой поддержки.

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

Поступила: 19.11.2024 / Принята к печати: 11.12.2024 / Опубликовано: 28.02.2025

Sergey V. Kuzmin, Vladimir N. Rusakov, Olga V. Esaulova, Andrey G. Setko

## Safety of food products treated with ionizing radiation (literature review)

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

### ABSTRACT

Irradiation of food products with ionizing radiation (OII) is a promising area in the food industry, which is actively developing and using in various countries of the world. This method allows effectively combating dangerous pathogens, prevent food spoilage and extend their shelf life. Food irradiation is approved by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), WHO, and Codex Alimentarius as a safe method of food preservation. Currently, irradiation of several categories of food is allowed in Russia. In this regard, safety issues for consumers of such products are acute. Food exposure leads to radiation, microbiological, and chemical changes in food, but their safety is comparable to that of products treated with other traditional processing methods such as heating, pasteurization and canning. Irradiation of food products does not lead to their radioactivity. According to the Codex Alimentarius, the maximum absorbed dose during irradiation should not exceed 10 kGy. Irradiation of fatty foods leads to the formation of 2-alkylcyclobutanones (2-ACB). Cytotoxic and genotoxic effects of 2-ACB have been confirmed in studies, but only in the case of high concentrations of these compounds. In products irradiated with doses up to 59 kGy, 2-batteries are formed in low concentrations, therefore, irradiation of food products also does not lead to mutagenic or genotoxic effects. The research data confirm the absence of radiation, microbiological, and toxicological risks if the recommended doses and regimens are observed.

**Keywords:** food irradiation; safety; ionizing radiation; food safety; review

**For citation:** Kuzmin S.V., Rusakov V.N., Esaulova O.V., Setko A.G. Safety of food products treated with ionizing radiation (literature review). *Zdravookhranenie Rossijskoi Federatsii / Health Care of the Russian Federation, Russian journal*. 2025; 69(1): 60–64. <https://doi.org/10.47470/0044-197X-2025-69-1-60-64> <https://elibrary.ru/fdqjoc> (in Russian)

**For correspondence:** Vladimir N. Rusakov, e-mail: [rusakov.vn@fncg.ru](mailto:rusakov.vn@fncg.ru)

**Contribution of the authors:** Kuzmin S.V. — the concept and design of the study, collection and processing of material, writing text; Rusakov V.N. — collection and processing of material, writing text, editing; Esaulova O.V. — collection and processing of material; Setko A.G. — writing text, editing. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

**Acknowledgment.** The study had no sponsorship.

**Conflict of interest.** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest in connection with the publication of this article.

Received: November 19, 2024 / Accepted: December 11, 2024 / Published: February 28, 2025

Актуальные вопросы гигиены

## Введение

Перспективным направлением в сфере передовых технологий, обеспечивающих качество и безопасность пищевых продуктов (ПП), является их облучение ионизирующим излучением (ОИИ). Мировой рынок ОИИ ПП оценивался в 199,4 млрд долл. в 2021 г., при этом среднегодовой темп роста в течение прогнозируемого периода (с 2020 по 2030 г.) составляет 5% [1].

В настоящее время ОИИ используется более чем в 60 странах. С его помощью ежегодно обрабатывается около 1,3 млн т сельскохозяйственной и пищевой продукции, в том числе 63% — в Китае, 22% — в США. В мире функционируют около 500 центров ОИИ [2]. Основные объекты применения ОИИ — фрукты, овощи и зерно для предотвращения порчи, сохранения качества и снижения риска заражения вредными патогенами.

В России разрешено ОИИ нескольких категорий ПП: специи и травы, мясные продукты, рыба и свежие сельскохозяйственные продукты. В этой связи актуальными являются вопросы безопасности для потребителей ПП, подвергшихся ОИИ.

**Цель обзора** — провести анализ материалов научных исследований, касающихся безопасности ПП, подвергшихся ОИИ.

Осуществлён научный обзор исследований с использованием информационных порталов eLIBRARY.RU, Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), Science Direct, PubMed и Scopus. Поиск осуществляли по ключевым словам «безопасность облучённых ионизирующим излучением продуктов питания», «оценка микробиологических показателей облучённых продуктов питания», «оценка токсикологических показателей облучённых продуктов питания».

ОИИ ПП — это достаточно мягкая обработка, поскольку доза радиации 1 кГр представляет собой поглощение энергии, достаточной для повышения температуры продукта на 0,36°C. Это означает, что нагревание, сушка и приготовление пищи приводят к более высоким потерям питательных веществ. Кроме того, в облучённых ПП не были обнаружены гетероциклические кольцевые соединения и канцерогенные ароматические соединения, образующиеся при термической обработке ПП при высоких температурах [3].

В 1999 г. ВОЗ одобрила использование высоких доз облучения и заявила, что не существует никаких проблем, касающихся безопасности или полезности облучённых ПП. В общем выводе говорилось: «ПП, облучённые в любой дозе, необходимой для достижения намеченной технологической цели, безопасны для употребления и являются питательными. Соответственно, облучённые продукты считаются полезными во всем технологически полезном диапазоне доз от менее 10 кГр до предполагаемых доз выше 10 кГр» [4]. В настоящее время ОИИ ПП в дозах более 10 кГр применяется при разработке высококачественных полуфабрикатов длительного хранения для конкретных целевых групп: люди с ослабленным иммунитетом, находящиеся под медицинским наблюдением, космонавты, военнослужащие.

## Действие ионизирующего излучения

Основными мишенями ОИИ являются нуклеиновые кислоты и липиды клеточных мембран [5].

Ионизирующее излучение может оказывать прямое воздействие, вызываемое активными кислород-центрированными ( $\bullet\text{OH}$ ) радикалами, возникающими в резуль-

тате радиолиза воды, и косвенное, воздействующее на организмы и ПП. Ионизирующее излучение вызывает повреждение клеточной мембраны и других структур (сублетальное повреждение). Изменение мембранных липидов, особенно полиненасыщенных жирных кислот, приводит к нарушению мембран и влияет на различные функции мембран, такие как проницаемость. Может быть нарушена активность мембранных ферментов [6].

Косвенный эффект (повреждение нуклеиновых кислот) возникает, когда излучение ионизирует соседнюю молекулу, которая, в свою очередь, вступает в реакцию с генетическим материалом. Излучение косвенно воздействует на молекулы воды — основной компонент клетки, и другие органические молекулы в клетке, в результате чего образуются свободные радикалы, такие как гидроксил и алкоксил, которые характеризуются неспарённым электроном в структуре, который очень реактивен и поэтому реагирует с молекулами ДНК, вызывая молекулярные структурные повреждения. Перекись водорода также считается токсичной для молекулы ДНК. Влияние свободных радикалов на молекулы ДНК заключается в нарушении функции или гибели клетки. Их производство зависит от общей дозы. Обнаружено, что большая часть радиационных повреждений возникает в результате непрямого воздействия, поскольку вода составляет почти 70% состава клетки [7].

Оптимальная доза облучения — это баланс между технологической целью облучения (радуризация, радиационная, радаппертизация) и негативными эффектами (потеря питательной ценности продукта, его структурная деформация и др.) [8].

Биологические эффекты, вызываемые облучением, являются, прежде всего, результатом разрушения ДНК или РНК в ядрах клеток. ДНК намного больше, чем другие молекулярные структуры, и имеет очень длинную лестницу, закрученную в двойную спираль в клетке. Поэтому, если она повреждается в результате первичной ионизации либо вторичной атаки свободных радикалов, индуцированные биологические и химические изменения могут предотвратить репликацию и разрушают клетки. Таким образом, микроорганизмы, гаметы насекомых и меристемы растений не могут размножаться, что, как следствие, приводит к различным консервирующим эффектам в зависимости от поглощённой дозы радиации [9].

## Радиационная безопасность

Исследования по оценке приемлемости облучённых ПП показали, что потребителей беспокоит главным образом то, что облучённые ПП являются радиоактивными, т. е. фундаментальное непонимание разницы между облучёнными и радиоактивными продуктами [10, 11].

Процесс облучения включает в себя пропускание ПП через радиационное поле с заданной скоростью и контролем количества энергии и поглощаемой дозы.

Ни на одном этапе процесса облучения ПП не вступают в контакт с источником радиации. Установлено, что невозможно индуцировать радиоактивность ПП с помощью  $\gamma$ -лучей или электронных пучков с энергией до 10 МэВ [12, 13].

Исследования, проведённые МАГАТЭ, показали, что увеличение дозы радиационного фона ПП, облучённых до средней дозы ниже 60 кГр  $\gamma$ -лучами кобальта-60 или цезия-137, электронами с энергией 10 МэВ или рентгеновскими лучами с энергией ниже 5 МэВ, незначительно и характеризуется как ноль [14].

Кодекс Алиментариус, основываясь на экспериментальных данных, полученных ВОЗ, Продовольственной и сельскохозяйственной организацией Объединённых Наций и МАГАТЭ, установил, что максимальная поглощённая доза ПП при их ОИИ не должна превышать 10 кГр. При этом уровень энергии рентгеновских лучей и электронов, генерируемых машинными источниками, должен составлять 5 МэВ (или ниже) и 10 МэВ соответственно для предотвращения наведённой радиоактивности в облучённых ПП [15].

### Микробиологическая безопасность

Ионизирующее излучение значительно снижает популяцию местной микрофлоры в ПП. Есть опасения, что эти «чистые» продукты позволяют более быстро размножаться патогенным бактериям, поскольку более низкие популяции аборигенной микрофлоры будут иметь меньшее антагонистическое действие на патогенные бактерии. В этой связи была исследована возможность того, что снижение конкурентной микрофлоры может способствовать росту патогенов, загрязняющих ПП после облучения. J.S. Dickson и соавт. облучали говяжий фарш дозами 0, 2 и 4 кГр, тем самым уменьшая порчу микрофлоры в мясе, а затем инокулировали его *Salmonella typhimurium* или *Escherichia coli* O157:H7. Мясо хранили при температуре 4, 15 или 25°C, контролировали рост бактерий [16]. Исследование не выявило существенных различий в росте бактерий в облучённом мясе по сравнению с необлучённым, что позволяет предположить, что отсутствие вызывающей порчу микрофлоры в говяжьем фарше не обеспечивает конкурентного преимущества для роста этих двух бактерий. D.M. Prendergast и соавт. исследовали рост *E. coli* O157:H7 при хранении при температуре 10°C на поверхности облучённых и необлучённых образцов мяса из разных частей говяжьих туш. *E. coli* O157:H7 в целом не росла и не выживала лучше на облучённых образцах [17].

Обеспокоенность по поводу радиационных мутаций микроорганизмов при ОИИ в ПП весьма значительна, поскольку уже много лет известно, что ионизирующая радиация вызывает мутации. Индукция радиационно-резистентных микробных популяций происходит, когда культуры экспериментально подвергаются повторным циклам радиации [18]. Мутации, возникающие у бактерий и других организмов, могут приводить к повышению, понижению или сходному уровню вирулентности или патогенности родительских организмов. Хотя теоретический риск остаётся, сообщений об индукции новых патогенов, связанных с ОИИ, не поступало.

Данные свидетельствуют о том, что патогенность микроорганизмов при облучении снижается [19]. Исследования транскрипционных изменений *S. typhimurium*, *Vibrio* spp. показали, что экспрессия генов вирулентности у облучённых мутантов *Salmonella* снижается, а экспрессия генов токсинов *Vibrio* spp. у облучённых мутантов не увеличивается по сравнению с необлучёнными аналогами [20].

У некоторых видов бактерий обнаружено повышение радиационной устойчивости при воздействии до 12 циклов облучения и культивирования выживших клеток. L. Levanduski и соавт. обнаружили, что кишечная палочка O157:H7, экспериментально инокулированная в говяжий фарш, увеличила радиорезистентность при воздействии 4 следующих циклов облучения электронным лучом на сублетальных уровнях ( $D_{10}$  значения увеличились с 0,24 до 0,63 кГр). Однако 5-й цикл облучения не привёл к дальнейшему повышению устойчивости [21].

D. Harris и соавт. подвергли культуры, полученные из одного изолята колонии *E. coli*, воздействию 20 итеративных циклов  $\gamma$ -облучения и выращивания [22]. Доза облучения была увеличена с 2 кГр (первый цикл) до 10 кГр (последний цикл). Результаты исследования показали прогрессивное увеличение радиационной устойчивости микроорганизмов в 1000–5000 раз при облучении дозой 5 кГр. Дальнейшие исследования в одной колонии показали, что приобретённая устойчивость сохранялась при выращивании бактерий в течение 100 поколений.

Следует отметить, что в промышленных условиях облучения ПП невозможна ситуация, при которой популяция микроорганизмов могла бы повторно реанимироваться после сублетального облучения путём обеспечения оптимальной питательной среды и оптимальных температур. К тому же существующие методики и технологические цели не предусматривают необходимости облучения в течение нескольких циклов. Таким образом, появление генотипов с более высокой радиационной устойчивостью в некоторых из этих экспериментов по переработке имеет скорее академическое, чем практическое значение.

### Токсикологическая безопасность

Токсикологическую безопасность облучённых ПП оценивали, включая различные облучённые ПП в рацион людей и животных: крыс, мышей, собак, перепелов, хомяков, кур, свиней и обезьян [23]. На протяжении всей жизни или нескольких поколений животных исследовали, чтобы определить, произошли ли изменения в росте, химическом составе крови, гистопатологии или воспроизводстве, которые могли бы быть связаны с потреблением различных типов облучённых ПП. Данные многих из этих исследований были изучены Объединённым комитетом экспертов по безвредности облучённых продуктов, который в 1980 г. пришёл к выводу о том, что «облучение любого пищевого товара общей дозой до 10 кГр не представляет токсикологической опасности... и не приводит к особым пищевым и микробиологическим проблемам» [24].

Безопасность облучённых ПП также была подтверждена исследованием лабораторных диет, стерилизованных ОИИ. Несколько поколений животных, получавших диету, облучённую в дозе 25–50 кГр, что значительно превышает дозу, используемую в пищу человека, не испытали мутагенных, тератогенных и онкогенных побочных эффектов, связанных с употреблением облучённой диеты [25].

На людях было проведено относительно мало экспериментов, большинство из которых осуществлено армией США [26]. Испытуемым проводили клиническое обследование, изучали их сердечную деятельность, гематологическую, печёночную и почечную функции. Все исследования были краткосрочными. Никаких клинических отклонений не было обнаружено в течение 1 года после испытаний [26]. Один из наиболее известных экспериментов по кормлению человека был проведён в 1975 г., когда в рацион 15 истощённых детей в Индии включили пшеницу, облучённую в дозе 0,75 кГр. В ходе исследования наблюдали увеличение частоты полиплоидии и количества аномальных клеток. Когда облучённая диета была прекращена, аномальные клетки вернулись к базальному уровню. Авторы объяснили эти наблюдения употреблением облучённой пищи [27]. Однако, когда отчёт был изучен более внимательно, обнаружили, что было подсчитано только 100 клеток от каждого из 5 детей в каждой группе. Объём выборки был слишком мал, чтобы делать какие-либо выводы [28].

Облучение жиросодержащей пищи приводит к образованию семейства молекул, а именно 2-алкилциклобутанонов (2-АЦБ), которые возникают в результате радиационно-индуцированного разрушения триглицеридов [29]. 2-АЦБ были обнаружены исключительно в жиросодержащих облучённых ПП и до сих пор никогда не обнаруживались в необлучённых ПП, подвергнутых другим пищевым процессам [30, 31]. Таким образом, эти соединения считаются уникальными маркерами облучения ПП. В облучённых ПП уровень образующихся 2-АЦБ пропорционален содержанию жира и поглощённой дозе [32].

Проведено несколько исследований для определения токсикологических и мутагенных эффектов, связанных с потреблением 2-АЦБ. Эти исследования показали, что 2-АЦБ не оказывают мутагенного или генотоксического действия на клеточные линии млекопитающих в низких концентрациях [33].

Установлено, что в ПП, облучённых дозами до 59 кГр, 2-АЦБ образуются в очень низких концентрациях, не представляющих угрозы для здоровья человека [34].

Цитотоксические и генотоксические эффекты были подтверждены в этих исследованиях, но только в случае высоких концентраций 2-АЦБ, которых нет в ПП, облучённых в допустимых дозах [35, 36].

В настоящее время трудно определить, каким высоким дозам 2-АЦБ может подвергнуться человеческий организм, поскольку нет данных о потреблении облучённых ПП. Один из немногих анализов в этой области был проведён С.Н. Sommers и соавт. [37]. Они обнаружили, что потребление радиационнооблучённого мяса птицы, составляющее в среднем 62,1 г/день, может обеспечить содержание 2-АЦБ в данном случае примерно 0,24 мкг/кг массы тела/день (при условии, что вся потребляемая домашняя птица получена в результате облучения и при отсутствии других облучённых продуктов в рационе).

Полученный результат можно сравнить с пороговым значением токсикологической опасности, что составляет 1,5 мкг/человека/день для 2-АЦБ. Реальный уровень 2-АЦБ в облучённых ПП может сильно варьироваться — исследования показали, что количество этих соединений зависит от содержания жира и жирнокислотного состава пищи, дозы радиации и даже температуры процесса [38]. Большинство научных организаций, в том числе Европейское агентство по безопасности продуктов питания, признают необходимость проведения более детальных токсикологических и метаболических исследований в отношении 2-АЦБ [39].

Использование ОИИ в пищевой промышленности даёт возможность для борьбы с болезнетворными бактериями и паразитами в ПП, предотвращения послеуборочной обработки ПП потерь и продления срока годности скоропортящихся продуктов. Проведено много исследований для изучения безопасности облучённых ПП. Хотя данные показали, что обработка ОИИ приводит к радиационным, микробиологическим и химическим изменениям в ПП, их безопасность сравнима с продуктами, обработанными другими традиционными методами обработки, такими как нагрев, пастеризация и консервирование, при условии, что данная технология применяется в соответствии с регламентирующими документами.

## Заключение

ОИИ ПП одобрено как безопасный и практичный метод сохранения разнообразных ПП и снижения риска инфекционных заболеваний пищевого происхождения.

Данными многочисленных научных исследований подтверждено отсутствие радиационных, микробиологических и токсикологических рисков, связанных с применением ОИИ ПП в рекомендованных дозах и режимах в соответствии с требованиями стандартов и принципов надлежащей гигиенической практики.

## ЛИТЕРАТУРА

(п.п. 1, 3–37 см. References)

2. Козьмин Г.В., Санжарова Н.И., Кибина И.И., Павлов А.Н., Тихонов В.Н. Радиационные технологии в сельском хозяй-

стве и пищевой промышленности. *Достижения науки и техники АПК*. 2015; 29(5): 87–92. <https://elibrary.ru/twqnrh>

## REFERENCES

1. Coherent Market Insights. Food irradiation market. Available at: <https://www.coherentmarketinsights.com/market-insight/food-irradiation-market-2173>
2. Koz'min G.V., Sanzharova N.I., Kibina I.I., Pavlov A.N., Tihonov V.N. Radiation technologies in agriculture and food industry. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2015; 29(5): 87–92. <https://elibrary.ru/twqnrh> (in Russian)
3. Becker R.L. In: Elias P.S., Cohen A.J., eds. *Recent Advances In Food Irradiation*. Amsterdam: Elsevier Biomedical Press; 1983.
4. High-dose irradiation: wholesomeness of food irradiated with doses above 10 kGy. Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Study Group. *World Health Organ Tech. Rep. Ser.* 1999; 890: i–vi, 1–197.
5. Arapcheska M., Spasevska H., Ginovska M. Effect of irradiation on food safety and quality. *Curr. Trends Nat. Sci.* 2020; 9(18): 100–6. <https://doi.org/10.47068/ctns.2020.v9i18.014>
6. Erkmén O., Bozoglu F. Food preservation by irradiation. In: *Food Microbiology: Principles Into Practice*. 1st ed. Oxford: John Wiley & Sons, Ltd.; 2016. <https://doi.org/10.1002/9781119237860>
7. Desouky O., Ding N., Zhou G. Targeted and non-targeted effect of ionizing radiations. *J. Radiat. Res. Appl. Sci.* 2015; 67(2): 247–54. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.03.003>
8. EFSA (European Food Safety Authority). Statement summarizing the conclusions and recommendations from the opinions on the safety of irradiation of food adopted by the BIOHAZ and CEF panels. *EFSA J.* 2011; 9(4): 2107. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.2107>
9. Smith S.J., Suresh P. Irradiation and food safety. *Food Technol.* 2004; 58(11): 48–55.
10. Bruhn C.M. Consumer attitudes and market response to irradiated food. *J. Food Prot.* 1995; 58(2): 175–81. <https://doi.org/10.4315/0362-028x-58.2.175>
11. Resurreccion A.V.A., Galvez F.C.F., Fletcher S.M., Misra S.K. Consumer attitudes toward irradiated food: results of a new study. *J. Food Prot.* 1995; 58(2): 193–6. <https://doi.org/10.4315/0362-028x-58.2.193>
12. Farkas J. Charged particle and photon interactions with matter. In: Mozumder A., Hatano Y., eds. *Food Irradiation*. New York: Marcel Dekker; 2004.
13. Thayer D. Food irradiation: Benefits and concerns. *J. Food Qual.* 2007; 13(3): 147–69. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.1990.tb00014.x>
14. IAEA. Natural and induced radioactivity in food. International Atomic Energy Agency Technical Documents (IAEA-TECDOCs). 2002; 1287: 136.
15. Codex Alimentarius Commission. Codex general standard for irradiated foods (CODEX STAN 106-1983, Rev.1-2003); 2003. Available at: <https://www.dairyboard.co.sz/standard/irradiatedStan.pdf>

16. Dickson J.S., Olson D.G. Growth of salmonellae in previously irradiated ground beef. Proceedings of the 86<sup>th</sup> International Association of Milk, Food and Environmental Sanitarians Annual Meeting; 1999; Dearborn, MI.
17. Prendergast D.M., Crowley K.M., McDowell D.A., Sheridan J.J. Survival of *Escherichia coli* O157:H7 and non-pathogenic *E. coli* on irradiated and non-irradiated beef surfaces. *Meat Sci.* 2009; 83(3): 468–73. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.06.024>
18. EFSA Panel on Biological Hazards (BIOHAZ). Scientific Opinion on Irradiation of food (efficacy and microbiological safety). *EFSA J.* 2011; 9(4): 2103. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.2103>
19. EFSA (European Food Safety Authority). Statement summarizing the conclusions and recommendations from the opinions on the safety of irradiation of food adopted by the BIOHAZ and CEF panels. *EFSA J.* 2011; 9(4): 2107.
20. Lim S., Jung J., Kim D. The effect of gamma radiation on the expression of the virulence genes of *Salmonella Typhimurium* and *Vibrio* spp. *Radiat Phys. Chem.* 2007; 76(11): 1763–6.21.
21. Levanduski L., Jaczynski J. Increased resistance of *Escherichia coli* O157:H7 to electron beam following repetitive irradiation at sub-lethal doses. *Int. J. Food Microbiol.* 2008; 121(3): 328–34. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2007.11.009>
22. Harris D.R., Pollock S.V., Wood E.A., Goiffon R.J., Klingele A.J., Cabot E.L., et al. Directed evolution of ionizing radiation resistance in *Escherichia coli*. *J. Bacteriol.* 2009; 191(16): 5240–52. <https://doi.org/10.1128/jb.00502-09>
23. Sofronie I.V. Food irradiation A series of Fact Sheets from the International Consultative Group on Food Irradiation Facts about; 2021. Available at: <https://vk.cc/cILHT9>
24. Wholesomeness of irradiated food: report of a joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee. *World Health Organ. Tech. Rep. Ser.* 1981; 659: 1–34.
25. Kava R. *Irradiated Foods*. 6th ed. New York: American Council on Science and Health; 2007. Available at: <https://www.acsh.org/sites/default/files/Irradiated-Foods-ACSH-2007.pdf>
26. Fielding L. *The Safety Of Irradiated Foods: A Literature Review. Technical Report*. Food Standards Agency Project A05009; 2007.
27. Bhaskaram C., Sadasivan G. Effects of feeding irradiated wheat to malnourished children. *Am. J. Clin. Nutr.* 1975; 28(2): 130–5. <https://doi.org/10.1093/ajcn/28.2.130>
28. Enhancing food safety through irradiation. Report of the International Consultative Group on Food Irradiation (ICGFI), Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques, Vienna; 1999.
29. Letellier P.R., Nawar W.W. 2-Alkylcyclobutanones from the radiolysis of triglycerides. *Lipids.* 1972; 7(1): 75–6. <https://doi.org/10.1007/bf02531273>
30. Crone A.V.J., Hand M.V., Hamilton J.T.G., Sharman N.D., Boyd D.R., Stevenson M.H. Synthesis, characterisation and use of 2-tetradecylcyclobutanones together with other cyclobutanones as markers of irradiated liquid whole egg. *J. Sci. Food Agric.* 1993; 62: 361–7. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740620409>
31. Ndiaye B., Jamet G., Miesch M., Hasselmann C., Marchioni E. 2-Alkylcyclobutanones as markers for irradiated foodstuff (II) The CEN method field of application and limit of utilisation. *Radiat. Phys. Chem.* 1999; 55: 437–45.
32. Hartwig A., Pelzer A., Burnouf D., Titéca H., Delincée H., Briviba K., et al. Toxicological potential of 2-alkylcyclobutanones – specific radiolytic products in irradiated fat-containing food – in bacteria and human cell lines. *Food Chem. Toxicol.* 2007; 45(12): 2581–91. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2007.05.033>
33. 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>
34. Buczkowska M., Jabczyk M., Górski M. Food irradiation – legal, commercial and toxicological aspects. *Med. Og. Nauk. Zdr.* 2020; 26(2): 106–17.
35. 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>
36. Kobayashi Y. Food Irradiation: Radiation-based sterilization, insecticidal, and inhibition of sprouting technologies for foods and agricultural produce. In: Kudo H., ed. *Radiation Applications*. Singapore: Springer; 2018.
37. Sommer C.H., Delincée H., Smith J.S., Marchioni E. Toxicological safety of irradiated foods. In: Fan X., Sommers C.H., eds. *Food Irradiation Research and Technology*. 2<sup>nd</sup> ed. Blackwell Publishing; 2013.
38. Byun M.W., Lee K.H., Kim D.H., Kim J.H., Yook H.S., Ahn H.J. Effects of gamma radiation on sensory qualities, microbiological and chemical properties of salted and fermented squid. *J. Food Prot.* 2000; 63(7): 934–9. <https://doi.org/10.4315/0362-028x-63.7.934>
39. 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>

### Информация об авторах

Кузьмин Сергей Владимирович, доктор мед. наук, профессор, директор ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Мытищи, Россия. E-mail: [kuzmin.sv@fncg.ru](mailto:kuzmin.sv@fncg.ru)

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

Есаулова Ольга Владимировна, канд. экон. наук, руководитель НИЦ «Радиационные биотехнологии», ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Мытищи, Россия. E-mail: [esaulova.ov@fncg.ru](mailto:esaulova.ov@fncg.ru)

Сетко Андрей Геннадьевич, доктор мед. наук, профессор, зав. отделом гигиены питания ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Мытищи, Россия. E-mail: [setko.ag@fncg.ru](mailto:setko.ag@fncg.ru)

### Information about the authors

Sergey V. Kuzmin, DSc (Medicine), Professor, 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@fncg.ru](mailto:kuzmin.sv@fncg.ru)

Vladimir N. Rusakov, PhD (Medicine), leader researcher of the Department of Food Hygiene, F.F. Erisman Federal Scientific Center of Hygiene, Mytishchi, 141014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-9514-9921> E-mail: [vladrus2005@gmail.com](mailto:vladrus2005@gmail.com)

Olga V. Esaulova, PhD (Economy), Head of the Scientific Research Center «Radiation biotechnologies», Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishchi, 141014, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0007-1936-1673> E-mail: [esaulova.ov@fncg.ru](mailto:esaulova.ov@fncg.ru)

Andrey G. Setko, DSc (Medicine), Professor, Head of the Department of Food Hygiene, Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishchi, 141014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-6887-6776> E-mail: [setko.ag@fncg.ru](mailto:setko.ag@fncg.ru)