



Эффективность применения инновационных технологий ионизирующего излучения для обеззараживания рыбной продукции

<https://doi.org/10.36038/0131-6184-2025-6-147-156>

EDN: LUVNL1

Научная статья УДК 614.31:637.56

Кузьмин Сергей Владимирович – доктор медицинских наук, профессор, директор ФБУН «Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, Московская область, г. Мытищи, Россия

E-mail: fncg@fncg.ru

Есаулова Ольга Владимировна – кандидат экономических наук, руководитель НИЦ «Радиационные биотехнологии», Московская область, г. Мытищи, Россия

E-mail: esaulova.ov@fncg.ru

Мошенская Нина Владимировна – кандидат химических наук, заместитель руководителя по сертификации НИЦ «Радиационные биотехнологии», Московская область, г. Мытищи, Россия

E-mail: moschenskaya.nv@fncg.ru

Скопин Антон Юрьевич – кандидат медицинских наук, доцент, заведующий отделом научного обеспечения лабораторных исследований продукции и объектов окружающей среды, Московская область, г. Мытищи, Россия

E-mail: skopin.ayu@fncg.ru

Балакаева Алиса Викторовна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела научного обеспечения лабораторных исследований продукции и объектов окружающей среды, Московская область, г. Мытищи, Россия

E-mail: balakaeva.AV@fncg.ru

Русаков Владимир Николаевич – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник отдела гигиены питания, Московская область, г. Мытищи, Россия

E-mail: rusakov.vn@fncg.ru

Барвина Анна Ярославовна – заместитель руководителя НИЦ «Радиационные биотехнологии», Московская область, г. Мытищи, Россия

E-mail: barvina.ay@fncg.ru

Федеральный научный центр гигиены имени Ф.Ф. Эрисмана

Адрес: Россия, 141000, Московская область, г. Мытищи, ул. Семашко, д. 2

Аннотация. Рыбная продукция может быть подвержена различным видам микробного загрязнения, что в свою очередь может негативно сказаться на здоровье потребителей. Комплексный подход к обеспечению микробной и химической безопасности рыбной продукции, включая использование ионизирующего излучения, является важным шагом к обеспечению безопасности пищевых продуктов.

Целью нашего исследования стало научное обоснование условий эффективного применения инновационных технологий ионизирующего излучения для обеззараживания рыбной продукции. Изучено влияние поглощенной дозы облученной рыбной продукции на её физико-химические свойства, структурную целостность, функциональные свойства, показатели безопасности и пищевой ценности. Для этого проводилось определение количеств мезофильных аэробных и факультативно анаэробных микроорганизмов, общего числа дрожжевых и плесневых грибов в различные временные промежутки, а также фиксировались изменения физико-химических свойств и структурной

целостности рыбной продукции. Также на протяжении 42 дней проводились испытания образцов рыбной продукции при воздействии различных доз ионизирующего излучения (1, 3 и 5 кГр).

Показано, что ионизирующее излучение эффективно не только для уничтожения патогенных микроорганизмов, но и для продления срока хранения продукции с сохранением нормируемых показателей качества, что особенно актуально для рыбной продукции, которая имеет короткие сроки хранения и подвержена быстрому развитию признаков порчи, даже при незначительных отклонениях от установленных условий хранения и транспортировки.

Ограничение исследования. Безопасность использования радиационных технологий не изучалась.

Ключевые слова: радуризация, облучение пищевых продуктов, ионизирующее излучение, пищевая безопасность

Для цитирования: Кузьмин С.В., Есаулова О.В., Мощенская Н.В., Скопин А.Ю., Балаева А.В., Русаков В.Н. Эффективность применения инновационных технологий ионизирующего излучения для обеззараживания рыбной продукции. // Рыбное хозяйство. 2025. № 6. С. 147-156.
<https://doi.org/10.36038/0131-6184-2025-6-147-156>

THE EFFECTIVENESS OF USING INNOVATIVE TECHNOLOGIES OF IONIZING RADIATION FOR DISINFECTION OF FISH PRODUCTS

Sergey V. Kuzmin – Doctor of Medical Sciences, Professor, Director of the F.F. Federal Scientific Center for Hygiene. Erisman" of Rospotrebnadzor, Moscow region, Mytishchi, Russia

Olga V. Esaulova – Candidate of Economic Sciences, Head of Research and Development Center "Radiation Biotechnologies", Moscow region, Mytishchi, Russia

NinaV. Moshchenskaya – Candidate of Chemical Sciences, Deputy Head of Certification, Scientific Research Center "Radiation Biotechnologies", Moscow region, Mytishchi, Russia

Anton Yu. Skopin – Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Scientific Support for Laboratory Research of Products and Environmental Facilities, Moscow region, Mytishchi, Russia

Alisa V. Balakaeva – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher at the Department of Scientific Support for Laboratory Research of Products and Environmental Facilities, Moscow Region, Mytishchi, Russia

Vladimir N. Rusakov – Candidate of Medical Sciences, Leading Researcher at the Department of Food Hygiene, Moscow region, Mytishchi, Russia

Anna Ya. Barvina – Deputy Head of the Research and Development Center "Radiation Biotechnologies", Moscow Region, Mytishchi, Russia

Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman

Address: Russia, 141014, Moscow Region, Mytishchi, Semashko St., 2

Annotation. Fish products can be susceptible to various types of microbial contamination, which in turn can negatively impact consumer health. A comprehensive approach to ensuring the microbial and chemical safety of fish products, including the use of ionizing radiation, is an important step toward ensuring food safety and protecting public health. The aim of our study was to scientifically substantiate the conditions for the effective use of innovative ionizing radiation technologies for the disinfection of fish products. We studied the effect of the absorbed dose of irradiated fish products on their physicochemical properties, structural integrity, functional properties, safety indicators, and nutritional value. For this purpose, we determined the quantities of mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms, the total number of yeasts and molds at various time points, and recorded changes in the physicochemical properties and structural integrity of the fish products. Fish product samples were also tested over a 42-day period under various doses of ionizing radiation (1, 3, and 5 kGy). Ionizing radiation was shown to be effective not only in killing pathogenic microorganisms but also in extending the shelf life of products while maintaining standard quality indicators. This is particularly important for fish products, which have short shelf lives and are susceptible to rapid spoilage even with minor deviations from established storage and transportation conditions.

Limitations of the study. The safety of using radiation technologies has not been studied.

Keywords: radurization, food irradiation, ionizing radiation, food safety

For citation: Kuzmin S.V., Esaulova O.V., Moshenskaya N.V., Skopin A.Yu, Balakaeva A.V, Rusakov V.N. (2025). The effectiveness of using innovative technologies of ionizing radiation for disinfection of fish products // Fisheries. No. 6. Pp. 147-158. <https://doi.org/10.36038/0131-6184-2025-6-147-156>

Таблицы – авторские / The tables were made by the author

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы качества и безопасности пищевых продуктов непосредственно связаны со здоровьем населения и являются важным фактором развития любого государства. Охрана здоровья граждан в Российской Федерации провозглашена в Конституции РФ (ст. 7).

Согласно Доктрине продовольственной безопасности Российской Федерации (Указ Президента РФ от 30.01.2010 № 120 «Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности РФ») [1], для обеспечения безопасности пищевых продуктов необходимо контролировать соответствие требованиям законодательства в этой области сельскохозяйственной, рыбной продукции и продовольствия, в том числе – импортированных, на всех стадиях их производства, хранения, транспортировки, переработки и реализации.

В последние годы стали уделять большое внимание вопросам обеззараживания продукции ионизирующими излучением. Радуризация продуктов питания – это радиационная обработка пищевых продуктов с целью увеличения продолжительности хранения в дозах, приводящих к ограниченному подавлению патогенных для человека микроорганизмов, вызывающих порчу продукции. Таким образом, обработка продуктов ионизирующими излучением призвана повысить их безопасность и продлить срок годности.

Рыба и морепродукты относятся к скоропортящейся продукции с высокой водоёмкостью и нейтральным pH, что создаёт благоприятные условия для роста микроорганизмов, поэтому применение инновационной технологии радуризации, в отношении продукции этой категории, представляется весьма актуальным.

Использование ионизирующего излучения для обработки пищевых продуктов регламентируется рядом международных и национальных документов. В глобальном масштабе основополагающим является стандарт Кодекса Алимен-

тариус¹ – General Standard for Irradiated Foods, Codex STAN 106-1983 (генеральный стандарт на облученные пищевые продукты) (далее – Codex). Согласно этому стандарту, максимальная среднемассовая доза облучения пищевых продуктов не должна превышать 10 кГр, если только более высокая доза не обоснована технологической необходимостью [2]. В пределах этого лимита (≤ 10 кГр) признано, что пища остается безопасной и полноценной. Совместный комитет ФАО/ВОЗ/МАГАТЭ подтвердил, что облученные продукты не токсичны и нутритивно эквивалентны необлученным, вплоть до доз, необходимых для достижения цели обработки [3]. Для рыбы и морепродуктов конкретных отдельных стандартов Codex не устанавливали, однако действует Общий стандарт и Кодекс практики по облучению, предписывающий принципы радуризации (предупредительной дозной пастеризации). Codex рекомендует указывать факт обработки на этикетке продукта словами «Облучено» или международным значком RADURA.

В Европейском Союзе к облученной пищевой продукции предъявляются требования Регламента 1999/2/EC² и 1999/3/EC³. В настоящее время в ЕС разрешено облучение ограниченного списка продуктов (главным образом – сушёных трав, специй и приправ), и рыба не включена в этот перечень для свободной торговли – её облучение не широко практикуется. Тем не менее, некоторые страны ЕС ранее проводили оценку возможности такого рода обработки на национальном уровне. Например, во Франции, Нидерландах, Великобритании были установлены допуски на обработку рыбы до 3 кГр [4]. Европейское агентство EFSA (панель BIOHAZ) в своем научном заключении 2010 г. рассмотрело риски паразитов в рыбопродукции и подтвердило, что обязательная заморозка является эффективной мерой против Anisakis, тогда как облучение упомянуто как возможная дополнительная технология, требующая дальнейшей оценки [5]. EFSA от-

¹ Стандарты Codex (Codex Alimentarius) – это свод международных стандартов, правил и руководств, касающихся пищевых продуктов, разработанный совместными усилиями Продовольственной и сельскохозяйственной организаций ООН (ФАО) и Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ)

² 1999/2/EC – директива Европейского парламента и Совета Европейского Союза от 22 февраля 1999 года «О сближении законодательств государств-членов ЕС относительно пищевых продуктов и их компонентов, обработанных ионизирующими излучением»

³ Директива 1999/3/EC Европейского парламента и Совета от 22 февраля 1999 г. о создании перечня Сообщества пищевых продуктов и пищевых ингредиентов, обработанных ионизирующими излучением

метила, что традиционные методы (соление, маринование, холодное копчение) могут быть недостаточны против паразитов, и потому либо заморозка, либо эквивалентная обработка (теоретически, облучение) необходимы [5]. Однако на уровне ЕС применение ионизирующего излучения для облучения рыбной продукции пока не регулировано отдельно и любые такие продукты должны проходить индивидуальные согласования.

В Соединённых Штатах Америки и ряде других стран облучение рыбы разрешено с соблюдением определенных условий. США еще в 1980-х оценивали облучение морепродуктов: FDA⁴ установили максимальную дозу 3 кГр для рыбы и ракообразных в целях обеззараживания от патогенов и паразитов [6]. Позднее (2005–2014 гг.) были одобрены петиции на облучение моллюсков, креветок и прочих морепродуктов. Например, в США сейчас разрешено облучение свежих и замороженных моллюсков излучением дозой до 5,5 кГр, ракообразных – до 6,0 кГр с целью уничтожения патогенов (включая *Vibrio spp.*). Для рыбного филе конкретное правило отсутствует, но по аналогии считается допустимым диапазон ~2–3 кГр. Канада и Бразилия также допускают облучение рыбы, устанавливая дозовые пределы около 2,2–3 кГр [6]. В Азии (Китай, Таиланд, Вьетнам) практикуются программы радиационной обработки сушёной рыбы, морепродуктов – там нормативы опираются на Codex (≤ 10 кГр) и национальные стандарты.

В Российской Федерации и на пространстве Евразийского экономического союза (ЕАЭС) нормативная база, относительно облучения пищевых продуктов, активно развивается. Базовые требования безопасности пищевой продукции изложены в Техническом регламенте Таможенного союза (ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции») [7]. Прямо облучение там не запрещается: регламент указывает, что при использовании технологических вспомогательных средств и обработка пища должна оставаться безопасной с уведомительной маркировкой для потребителя. Отдельный отраслевой регламент – ТР ЕАЭС 040/2016 «О безопасности рыбы и рыбной продукции» –

не содержит прямых норм облучения, но обязывает обеспечивать отсутствие в рыбе жизнеспособных паразитов и соответствие микробиологическим нормативам [8]. Однако в пояснениях отмечается, что облучение может применяться как мера обеспечения безопасности, если оно проводится по утверждённым стандартам [8].

С 2017 г. в РФ принят межгосударственный стандарт ГОСТ 34154-2017 «Рыба, морепродукты. Руководство по облучению с целью подавления патогенных и вызывающих порчу микроорганизмов» [9]. Этот стандарт (введен в действие с 2019 г.) регламентирует рекомендации по режимам облучения различных видов рыбопродуктов, допустимые дозы и условия обработки. В частности, там указано, что дозы 1–7 кГр эффективны для пастеризации рыбы, позволяя продлить срок хранения охлаждённой рыбы в 2–3 раза и предотвратить размножение *Listeria monocytogenes* и других опасных бактерий. Согласно требованиям ЕАЭС, вся облучённая пищевая продукция подлежит обязательной маркировке, с указанием факта облучения и дозы, либо использованием знака RADURA.

Таким образом, радиационная обработка рыбы уже имеет нормативно-методическую базу как на международном, так и на национальном уровне.

Эффективность радиационной обработки и сохранение качества напрямую зависят от условий хранения продукта. Ключевыми факторами являются температура и газовая среда упаковки. Установлено, что хранение при 0...+4 °C продлевает срок годности в 1,5–3 раза относительно контроля [10], в вакуумной или газовой упаковке с CO₂ достигается лучший эффект: минимизируется окисление, замедляется рост pH, сохраняется цвет [11], в вакууме продукты не портятся по сценарию слабокислого брожения, без появления гнилостного запаха [12].

Устойчивость различных микроорганизмов к обработке ионизирующими излучением неодинакова. Для уничтожения микроорганизмов (в частности, простейших, бактерий и микроскопических грибов) требуется большая доза облучения, чем для многоклеточных организмов, в частности, рыб, птиц и млекопитающих. Как правило, губительная доза облучения тем выше, чем ниже ступень развития организмов. При этом высокие дозы нередко оказывают разрушительное действие и на сами пищевые продукты, вызывая в них нежелательные изменения органолептических характеристик (вкус, запах, цвет, консистенция) [13].

В настоящем исследовании целью стало обоснование условий применения инновационных технологий ионизирующего излучения для обеззараживания рыбной продукции. Для её достижения решались 2 задачи:

- изучение влияния инновационной технологии ионизирующего излучения на ми-

⁴ FDA (англ. Food and Drug Administration, букв. «Управление еды и лекарств») – Управление по контролю качества пищевых продуктов и лекарственных средств США

- кробиологические показатели безопасности и органолептические свойства рыбной продукции и обоснование оптимальных условий ее хранения после обработки;
- исследование эффективности обработки рыбной продукции различными дозами ионизирующего излучения (1, 3 и 5 кГр) по изменению микробиологических и органолептических показателей, а также – физико-химических свойств.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования стала треска атлантическая свежемороженая, размороженная (ООО «РК «Полярное море+», изготовленная по ТУ 9261-017-49021315-2012, срок годности продукции при плюс 6-8 °С – 24 часа), весом 300 граммов.

Каждый образец был разделен на две отдельные пробы. Первая проба подверглась облучению сразу после разморозки, что позволило исследовать как ионизирующее излучение влияет на микробный состав. Вторая проба оставалась необлученной и использовалась в качестве контрольной, что позволяло сравнивать результаты и выявлять изменения, вызванные облучением.

Для решения первой задачи, при проведении эксперимента с целью оценки воздействия ионизирующего излучения на микробиологическое состояние продукта, с каждой пробы были осуществлены посевы на микробиологические питательные среды, которые затем хранились в холодильной камере при температуре от +6 до +8 °С (такой температурный диапазон способствует замедлению роста микроорганизмов и позволяет более точно оценить влияние времени хранения на микробиологические показатели). Посевы производились в три временных интервала: не позднее 24 час. после разморозки, не позднее 48 час. и не позднее 72 часов. Указанные временные рамки выбраны для отслеживания динамики изменений в микробиологическом состоянии образцов. Исследования проводились по двум микробиологическим показателям – КМАФАнМ (количество мезофильных аэробных и факультативно анаэробных микроорганизмов), выращенных на твердом питательном агаре, и общему содержанию дрожжевых и плесневых грибов, выращенных на агаре Сабуро.

Микробиологические исследования проводились в пяти временных интервалах для обеспечения детального мониторинга изменений. Первое исследование проводилось сразу после посева (фиксация начального микробного фона). Второе – через 24 час. (оценка начальных изменения в микробиологической актив-

ности). Третье – через 48 час. (для выявления скорости развития микроорганизмов в условиях хранения). Четвертое – через 3 сут., пятое – через 4 сут. (для оценки долгосрочных последствий хранения и облучения).

Исследование проводилось в специально подготовленном боксированном помещении с использованием ламинарных шкафов второго класса защиты для обеспечения асептических условий и предотвращения вторичной контаминации проб. Каждое из этих исследований проводилось не менее чем в трех повторностях для обеспечения достоверности результатов. Для каждого типа проб был сформирован специфический контроль без предварительной обработки.

Обработка проб производилась ионизирующими излучением, обеспечивающим поглощенную дозу величиной 2,5 кГр, на радиационно-технологической установке (РТУ) с ускорителем электронов на базе линейного ускорителя электронов УЭЛР-10-20С (классификация по ГОСТ 26278-1984), находящегося на территории ООО «Акцентр Групп» по адресу: Московская область, г. Дубна, ул. Технологическая, д. 4.

Для решения второй задачи, при оценке эффективности влияния ионизирующего излучения для анализа динамики изменения органолептических, микробиологических показателей, проводились испытания образцов на протяжении 42 дней, с интервалами в 1, 7, 14, 21, 28, 35 и 42 дня хранения. Из каждого образца в асептических условиях в указанные интервалы времени отбирали 10 г материала. Затем отобранные образцы гомогенизировались в течение одной минуты с 90 мл заранее охлажденного стерильного пептонно-физиологического раствора, подготовленного на основе стерильной деионизированной воды. Для обеспечения равномерного распределения микроорганизмов в образце использовался стерилизованный лабораторный блендер. После гомогенизации проводились десятичные серийные разведения, которые готовились из полученного гомогената (выполнялись в том же охлажденном стерильном разбавителе для сохранения условий, приближенных к первоначальным). Серийные разведения необходимы для точного определения количества микробных клеток в образце, так как они позволяют снизить концентрацию микроорганизмов до уровня, удобного для подсчета.

Также для оценки пищевой пригодности для потребления производились исследования образцов рыбы по определению содержания уровней тиобарбитуровой кислоты (ТБК) и летучих азотных соединений (ЛАС) в контрольных и облученных различными дозами ионизирующего излучения образцах.

ЛАС определялись классическим методом – микродиффузии Конвея или пародистилляции с титрованием. Определение ТБК (спектрофотометрия комплекса МДА–ТБК при 532 нм) проводилось в целях определения степени окисления жиров, которое, в свою очередь, приводит к потере вкуса, цвета, аромата и текстурных свойств, снижению пищевой ценности продуктов питания и образованию токсичных соединений.

В данном исследовании для изучения эффективности облучения рыбы использовались различные дозы радиации (1, 3 и 5 кГр).

Для проведения органолептической оценки (для решения обеих задач) образцы рыбы весом по 100 г раздельно подвергались кулинарной обработке в микроволновой печи мощностью 800 Вт при максимальном уровне 50% в течение 13 минут. Этот режим позволяет равномерно прогреть продукт, минимизируя риск его пересушивания или неравномерного приготовления. После завершения процесса приготовления образцы были охлаждены до температуры окружающей среды плюс 22–23 °C (для проведения сенсорной оценки при стабильной температуре, во избежание искажений в восприятии запаха и текстуры). В ходе сенсорной оценки определялись запах рыбы (общий аромат, свежесть, наличие посторонних запахов) и текстура (плотность, сочность и нежность мяса). Для оценки использовались порции рыбы весом около 20 граммов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При анализе свежемороженой трески атлантической, которая была разморожена для исследования, не были выявлены патогенные микроорганизмы, такие как *Salmonella* ssp., *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus* и *Proteus* ssp., что может свидетельствовать о безопасности продукта по микробиологическим показателям на момент начала исследований.

Результаты исследований по изучению влияния радиационной обработки на микробиологические показатели безопасности рыбной продукции, поступившей из торговой сети в упаковке производителя, а также – на этапе ее хранения в период срока годности (24 часа), спустя день и 2 дня после его завершения представлены в таблице 1. Определено количество мезофильных аэробных и факультативно анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ) и общее число дрожжевых и плесневых грибов.

Результаты, представленные в таблице, свидетельствуют, что рыбная продукция из торговой сети в потребительской упаковке на момент поступления соответствовала установленным нормативам по обоим показателям. Однако, при хранении рыбы при температуре +6–8 °C, на день истечения срока годности были зафиксированы превышения по показателю КМАФАнМ, тогда как облученная продукция соответствовала нормам.

Техническим регламентом Таможенного союза (ТР ТС 021/2011) «О безопасности пищевой продукции» (приложение 2 раздел 1.2) и техни-

Таблица 1. Динамика изменений усредненного показателя КМАФАнМ и общего числа дрожжевых и плесневых грибов в рыбной продукции на этапах хранения /
Table 1. Dynamics of changes in the average M-AFAM indicator and the total number of yeast and mold fungi in fish products at storage stages

| Сутки после посева 24 hours after inoculation | K | O | K | O | K | O | K | O | K | O | K | O |
|---|---|---|---|---|---|---|-------|--|-----|-----|-----------|-----|
| | Дрожжевые и плесневые грибы, КОЕ/г Yeast and mold fungi, CFU/g | КМАФАнМ, *10 ⁴ КОЕ/г M-AFAM, *10 ⁴ CFU/g | Дрожжевые и плесневые грибы, КОЕ/г Yeast and mold fungi, CFU/g | КМАФАнМ, *10 ⁴ КОЕ/г M-AFAM, *10 ⁴ CFU/g | Дрожжевые и плесневые грибы, КОЕ/г Yeast and mold fungi, CFU/g | КМАФАнМ, *10 ⁴ КОЕ/г M-AFAM, *10 ⁴ CFU/g | | | | | | |
| Хранение образца 1 день Sample storage: 1 day | | | | Хранение образца 2 дня Sample storage: 2 days | | | | Хранение образца 3 дня Sample storage: 3 days | | | | |
| 0-е | 0 | 0 | 3 | 0,7 | 0 | 0 | 7 | 0,3 | 0 | 0 | 866 | 460 |
| 1-е | 0,3 | 0 | 47 | 0,3 | 10 | 3 | 650 | 21 | - | - | - | - |
| 2-и | 0,3 | 0 | 67 | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 3-е | - | - | - | - | - | - | - | - | 300 | 0,7 | 866 | 867 |
| 4-е | 0,3 | 0 | 54 | 1,3 | 19,5 | 9 | 1000+ | 11 | 276 | 0,7 | Спл. рост | 867 |

Примечания: К – результаты исследования контрольного образца. О – результаты исследования облученного образца
 «–» – испытания не были завершены в полном объеме и не имеют достоверного усредненного результата

Notes: K – results of the control sample test, O – results of the irradiated sample test
 «–» – the tests were not fully completed and do not have a reliable average result

ческим регламентом Евразийского экономического союза (ТР ЕАЭС 040/2016) «О безопасности рыбы и рыбной продукции» (приложение 1, таблица 1) установлен нормативный показатель КМАФАнМ (количество микробных клеток, образующих колонии в 1 г продукта), который составляет 5×10^4 КОЕ/г (для рыбы охлажденной, подмороженной и мороженой), содержание плесени и дрожжей – не более 100 КОЕ/г (для рыбной продукции, в том числе мороженой). Как видно из таблицы, динамика изменений в микробиологическом состоянии образцов показывает соответствие нормам облученной продукции по прошествии 48 часов после разморозки образца по сравнению с контролем.

Результаты определения физико-химических свойств и структурной целостности после облучения продукции, обеспечивающего поглощенную дозу 2,5 кГр, приведены в таблице 2.

Как видно из таблицы, изменений текстуры, цвета, структуры, а также эффектов выделения жидкости и, наоборот, высушивания, зафиксировано не было.

Исследование эффективности влияния различных доз ионизирующего излучения (1, 3 и 5 кГр) на микробиологические и органолептические показатели выявило следующее. В контрольных образцах, не подвергавшихся облучению, общее количество жизнеспособных микроорганизмов составляло 4,41 lg КОЕ/г. В то же время, в обработанных облучением образцах наблюдалось значительное снижение количества микроорганизмов: на момент первого дня хранения в холодильных условиях, при облучении с поглощенной дозой 1 кГр, количество снизилось до 3,08 lg КОЕ/г, при 3 кГр – до 1,46 lg КОЕ/г, а при 5 кГр – до 1 lg КОЕ/г.

Продукт, не подвергшийся облучению, имел приемлемое качество – уровень КМАФАнМ не превышал установленный верхний предел в 5×10^4 КОЕ/г для свежей рыбы. В дальнейшем, при хранении, общее количество мезофильных микроорганизмов как в контрольной, так и в облученной рыбе увеличивалось, достигая среднего значения 7 lg КОЕ/г. Это значение

близко к верхнему пределу приемлемости для пресноводной и морской рыбы, что наблюдалось через 5 дней хранения для контрольной группы (0 кГр) и через 10 дней – для образца, обработанного дозой 1 кГр. В то же время, рыба, облученная дозами 3 и 5 кГр, не достигла этого уровня даже спустя 21 день.

Результаты показали, что облучение эффективно снизило количество *Pseudomonas spp.* во всех группах. Особенно заметным было снижение численности этих бактерий при дозах облучения в 3 и 5 кГр, где *Pseudomonas spp.* были полностью уничтожены. Кроме *Pseudomonas spp.*, в микрофлоре порчи рыбы также были обнаружены бактерии из семейства *Enterobacteriaceae*. Первоначально их количество составляло 1,22 lg КОЕ/г на седьмой день хранения, но к концу эксперимента контрольный образец показал увеличение до 3,29 lg КОЕ/г. В то же время для образцов, обработанных облучением, значения были значительно ниже: 2,29 lg КОЕ/г при облучении дозой 1 кГр и 1,45 lg КОЕ/г при облучении дозой 3 кГр. При использовании дозы 5 кГр рост *Enterobacteriaceae* не наблюдался.

Уровень ЛАС в диапазоне от 35 до 40 мг на 100 г мышц рыбы считается критическим, указывающим на то, что продукт испорчен [14]. В ходе эксперимента было отмечено, что значения ЛАС постепенно увеличиваются с увеличением срока хранения как в контрольных образцах, так и в образцах, подвергнутых обработке. В контрольных и облученных образцах при дозах 1 и 3 кГр значения ЛАС не показали значительного увеличения до 7-го дня хранения, оставаясь в пределах 17-25 мг на 100 г продукта. Однако после 7-го дня хранения наблюдалось резкое увеличение значений для контрольных образцов, которые достигли 79,8 мг на 100 г продукта, а облученные образцы продемонстрировали более низкие значения: 52,2 мг (при 1 кГр), 39,4 мг (при 3 кГр) и 28,2 мг (при 5 кГр) на 100 граммов. Предел приемлемости (находящийся в диапазоне от 35 до 40 мг на 100 г) был достигнут для необлученных образцов между

Таблица 2. Результаты изучения изменений физико-химических свойств и структурной целостности при облучении рыбной продукции (доза 2,5 кГр) /
Table 2. Results of the study of changes in the physicochemical properties and structural integrity of fish products during irradiation (dose 2.5 kGy)

| Параметр оценки Evaluation parameter | Изменение текстуры Change in texture | Изменение цвета Change in color | Выделение жидкости Liquid release | Высушивание Drying | Изменение структуры Change in structure |
|---|---|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|--|
| Результат оценки Evaluation result | | | Не зафиксировано Not registered | | |

14 и 17 днями хранения, в то время как для образцов, облученных дозами 1 и 3 кГр – на 17-21 дни. Образцы, подвергнутые облучению дозой 5 кГр, не достигли критического уровня ЛАС до конца эксперимента.

Начальные уровни ТБК находились на уровне примерно 0,4 мг на кг продукта. По мере хранения наблюдалось заметное увеличение значений: на 35-й день уровень ТБК в контрольных образцах достиг 5,29 мг на кг продукта, в то время как облученные образцы показали значительно более высокие значения: 6,03 мг на кг при облучении дозой 1 кГр, 7,26 мг на кг при дозе 3 кГр и 8,21 мг на кг при дозе 5 кГр. На 42-й день хранения наблюдалось снижение значений ТБК для всех образцов, включая контрольные, что может быть связано с естественными процессами разложения и окисления жиров. Конечные значения ТБК составили 4,1 мг на кг для контрольных образцов и 5,53, 5,95 и 6,47 мг на кг для облученных образцов при соответствующих дозах. Это свидетельствует о том, что даже при низких уровнях поглощенной дозы, значения ТБК для облученных образцов оставались выше, чем для контрольных на протяжении всего периода наблюдения.

СЕНСОРНАЯ ОЦЕНКА

Со временем хранения рыбы в холодильнике наблюдались изменения в ее запахе и текстуре. Для контрольных образцов нижний предел приемлемости запаха был достигнут в период между 4 и 7 днями. Обработанные ионизирующим излучением образцы демонстрировали более длительные сроки хранения: пределы приемлемости составили между 11 и 14 днями (1 и 3 кГр) и между 19 и 22 днями (5 кГр). Текстура рыбы претерпевала изменения, однако с меньшей интенсивностью по сравнению с изменениями запаха. Предел приемлемости текстуры был достигнут только для контрольных образцов через 42 дня хранения.

ОБСУЖДЕНИЕ

При оценке качества рыбной продукции мы ориентировались на нормативные показатели КМАФАнМ и общее число дрожжевых и плесневых грибов, являющиеся важными индикаторами санитарного состояния продукции и служащие важным критерием для оценки микробиологической безопасности рыбной продукции. Показано, что обработанная излучением продукция дольше сохраняла свои качества и соответствовала нормам по сравнению с контролем.

Полученные данные соответствуют литературным данным, свидетельствующим о снижении показателя КМАФАнМ в свежих креветках/крабах под действием радиации: доза 1-3 кГр

обычно даёт снижение общего титра микроорганизмов на 1-3 порядка, но при последующем хранении на холоде выжившая устойчивая микрофлора способна понемногу размножаться [15]. Более высокие дозы (5-6 кГр) подавляют основную часть микрофлоры порчи на весь срок хранения, предотвращая развитие процессов гниения. Особенно чувствительны к радиации психротрофные грамотрицательные бактерии (*Pseudomonas* и др.), ответственные за «рыбный» запах и порчу; они гибнут уже при малых дозах [12]. После облучения в вакууме в оставшейся микробиоте морепродуктов начинают доминировать более устойчивые к радиации грамположительные кокки и палочки (лактобактерии и др.), вызывающие слабокислый запах при очень длительном хранении, однако скорость их роста невелика [12]. Благодаря этому, облученные морепродукты портятся намного медленнее и «мягче», без резкого протухания. Вакуумная упаковка дополнительно смещает порчу в сторону слабокислой (молочнокислой) без развития гнилостных ароматов [12].

Сенсорная оценка рыбы включает в себя комплексный подход, который помогает не только определить качество продукта, но и выявить его привлекательность для конечного потребителя. Все эти аспекты играют важную роль в формировании потребительских предпочтений и влияют на успешность рыбы на рынке. Так как изменений физико-химических свойств и структурной целостности (текстуры, цвета, структуры, эффектов выделения жидкости и высыпивания) после облучения дозой 2,5 кГр обнаружено не было, можно сделать вывод, что доза облучения, достаточная для уменьшения количества микроорганизмов в образце пищевой продукции, не влияет в какой-либо степени на физико-химические свойства рыбы и её структурную целостность.

При оценке эффективности облучения рыбы с использованием различных доз радиации (1, 3 и 5 кГр) и его влияния на микробиологический состав показано, что контрольные образцы подходили к верхнему пределу приемлемости для пресноводной и морской рыбы 5×10^4 КОЕ/г через 5 дней хранения, обработанные дозой 1 кГр – через 10 дней хранения, в то время как облученные дозами 3 и 5 кГр не достигли этого уровня даже спустя 21 день. Таким образом, облучение дозами радиации 3 и 5 кГр приводит к значимому увеличению срока годности и сохранения качества рыбной продукции.

Pseudomonas spp. представляют собой группу бактерий, которые активно участвуют в процессе порчи различных видов рыб. Эти микроорганизмы известны своей способностью к быстрому размножению и выживанию в неблагоприятных условиях, что делает их зна-

чимыми патогенами в пищевой промышленности. Обнаружение *Enterobacteriaceae* может указывать на нарушение санитарных правил в процессе обработки или хранения продукции. Наиболее заметным снижение численности *Pseudomonas spp.* и *Enterobacteriaceae* было выявлено при облучении в 3 и 5 кГр, при этом использование дозы 5 кГр приводило к полному отсутствию роста данных микроорганизмов.

Полученные данные согласуются с результатами исследования Mohamed E. F. E. et al – уменьшение микробной обсеменённости имеет дозозависимый характер: доза 1 кГр снижает общий микробный фон примерно на 90% (на ~1 lg), 3 кГр – на 99,9% (~3–4 lg), а 5 кГр – до неопределляемого уровня [16].

ЛАС являются индикаторами качества необработанных рыбных продуктов. Их увеличение в образцах связано с активностью бактерий, вызывающих порчу, а также – с активностью эндогенных ферментов, которые могут способствовать разложению белков и образованию нежелательных соединений. К числу таких соединений относятся аммиак, моноэтиламин, ди-метиламин и триметиламин, которые придают рыбе неприятный вкус и запах. В ходе эксперимента установлено, что предел приемлемости для контрольных образцов наступал между 14 и 17 днями хранения, облученных – между 17 и 21 днями, тогда как облучение с использованием 5 кГр приводило к тому, что критический уровень ЛАС так и не был достигнут.

Содержание ТБК является важным индикатором окислительного стресса и степени окисления липидов в пищевых продуктах, включая рыбу. Окисление жиров может привести не только к ухудшению органолептических свойств, таких как вкус и запах, но и к образованию потенциально вредных для здоровья соединений. Результаты исследования показали, что увеличение дозы облучения привело к увеличению ТБК. Таким образом, хотя такая обработка может использоваться для продления срока хранения и уничтожения патогенных микроорганизмов, но также способствует увеличению окислительных процессов в продукте.

Подобное поведение значений показателя ТБК может быть объяснено образованием свободных радикалов, которые возникают в результате воздействия ионизирующего излучения. Эти радикалы могут инициировать цепные реакции окисления в липидах, что приводит к образованию перекисей и других окисленных соединений. Важно отметить, что окисление липидов не только влияет на качество продукта, но и может приводить к образованию токсичных веществ, таких как альдегиды и кетоны, которые потенциально опасны для здоровья человека.

Сенсорный анализ рыбы представляет собой важный инструмент для оценки ее свежести и качества. Свежесть, безусловно, является ключевым атрибутом, определяющим потребительские предпочтения и безопасность продукта. В процессе обработки и хранения рыбы происходят различные микробиологические и биохимические изменения, которые негативно влияют на ее качество и органолептические свойства. Эти изменения могут быть вызваны как действиями микроорганизмов, окислительными процессами, так и физическими факторами (температура и влажность). Запах рыбы является одним из первых факторов, который влияет на потребительское восприятие. Исследование показало, что нижние пределы приемлемости запаха для контрольных образцов были достигнуты на 4–7 дней хранения. Обработка дозами 1 и 3 кГр продляла этот срок примерно на неделю, обработка 5 кГр – на 2 недели. Отметим, что согласно литературным данным, свежее сырье (особенно в вакууме) обычно не приобретает «радиационного» запаха до доз ~5 кГр – облученная морская рыба и креветки сохраняют свойственный им аромат; дегустаторы не отличают облученные образцы от контроля, если доза и условия выбраны оптимально [17].

Предел приемлемости текстуры, достигнутый даже для контрольных образцов лишь через 42 дня хранения, указывает на то, что текстура может оставаться более стабильной в условиях хранения, чем ароматические качества.

Таким образом, можно сделать вывод о высокой эффективности использования облучения дозами 3 и 5 кГр для продления срока годности и более длительного обеспечения микробиологической безопасности продукции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное нами исследование подтверждает эффективность ионизирующего излучения при использовании не только в целях уничтожения патогенных микроорганизмов, но и для продления срока хранения продукции, что особенно актуально для рыбной продукции, которая имеет ограниченный срок годности. Хотя промышленное использование радиационной обработки рыбы пока ограничено, многочисленные исследования (ФАО, ВОЗ, МАГАТЭ, EFSA) подтверждают ее эффективность и безопасность при соблюдении установленных регламентов (дозы до 10 кГр, маркировка, контроль дозы и качества).

Финансирование: Исследование выполнено в рамках научно-исследовательской работы «Научное обоснование системы гигиенической регламентации качества, безопасности, сертификации и верификации сельскохозяйствен-

ного сырья и пищевой продукции, а также товаров народного потребления, прошедших ионизирующую обработку» по теме «Разработка технологических регламентов и режимов облучения (методик) сельскохозяйственной и пищевой продукции, а также товаров народного потребления, упаковки продукции» (Рег. № НИОКР 1022081000010-3-3.3.5).

Financing: The research was carried out within the framework of the research work "Scientific substantiation of the system of hygienic regulation of quality, safety, certification and verification of agricultural raw materials and food products, as well as consumer goods that have undergone ionizing treatment" on the topic "Development of technological regulations and irradiation modes (techniques) of agricultural and food products, as well as consumer goods, packaging of products" (R&D Reg. no. 1022081000010-3-3.3.5).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Вклад авторов в работу: С.В. Кузьмин – обсуждение статьи, редактирование; О.В. Есаулова – дизайн исследования, редактирование; А.Ю. Скопин – написание текста, обсуждение статьи, редактирование; А.В. Балакаева – написание текста, обсуждение статьи, редактирование; Н.В. Мощенская – сбор и обработка материала; В.Н. Русаков – сбор и обработка материала; А.Я. Барвина – сбор и обработка материала. Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

The authors declare that there is no conflict of interest. The authors' contribution to the work: S.V. Kuzmin – discussion of the article, editing; O.V. Esaulova – research design, editing; A.Yu. Skopin – writing the text, discussion of the article, editing; A.V. Balakaeva – writing the text, discussion of the article, editing; N.V. Moshenskaya – collection and processing of the material; V.N. Rusakov – collection and processing of material; A.Ya. Barvina – collection and processing of material. All co-authors are responsible for approving the final version of the article and ensuring the integrity of all parts of the article.

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

1. Козьмина Г.В., Гераськина С.А., Санжарова Н.И. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы / Под общ. ред. Г. В. Козьминой и др. – Обнинск: ФГБНУ «ВНИИРАЭ». 2015. С. 65-78.
2. Kozmina G.V., Geraskina S.A., Sanzharova N.I. Radiation technologies in agriculture and the food industry: state and prospects / Under the general editorship of G. V. Kozmina et al. – Obninsk: FGBNU "VNIIRAE". 2015. Pp. 65-78. (In Russ.)
3. Codex Alimentarius. General Standard for Irradiated Foods: CODEX STAN 106-1983 (Rev. 1-2003). – Rome: FAO/WHO. 2003. 7 p.
4. Badr H.M. Control of the potential health hazards of smoked fish by gamma irradiation // Int. J. Food Microbiol. 2012. 154(3):177-186.
5. EFSA BIOHAZ Panel. Scientific Opinion on risk assessment of parasites in fishery products // EFSA Journal. 2010. 8(4):1543.
6. World Health Organization. High-Dose Irradiation: Wholesomeness of Food Irradiated with Doses Above 10 kGy (Technical Report Series 890). – Geneva: WHO. 1999. 206 p.
7. СанПиН 2.3.2.1324-03 «Гигиенические требования к срокам годности и условиям хранения пищевых продуктов».
8. SanPiN 2.3.2.1324-03 "Hygienic requirements for shelf life and storage conditions of food products". (In Russ.)
9. ТР ЕАЭС 040/2016 «О безопасности рыбы и рыбной продукции» (утв. Решением Совета ЕЭК № 162 от 18.10.2016).
10. EAEU TR 040/2016 "On the safety of fish and fish products" (approved by the Decision of the EEC Council No. 162 dated 18.10.2016). (In Russ.)
11. GOCT 34154-2017 Рыба, морепродукты и продукты их переработки. Руководство по облучению. – М.: Стандартинформ. 2019. (In Russ.)
12. GOST 34154-2017 Fish, seafood and their processed products. Guidelines for irradiation. Moscow: Standartinform. 2019.
13. Urbain W.M. Food Irradiation. – Orlando: Academic Press. 1986. 351 p.
14. Lee H., et al. Effects of electron beam irradiation on physicochemical quality of frozen shrimp // Food Science of Animal Resources. 2020. 40(4):654-664.
15. Diehl J.F. Safety of Irradiated Foods. – 2nd ed. – New York: Marcel Dekker. 1995. 464 p.
16. GOCT 34155-2017 Руководство по дозиметрии при исследовании влияния радиации на пищевые и сельскохозяйственные продукты. (In Russ.)
17. GOST 34155-2017 Guidelines for dosimetry in the study of the effects of radiation on food and agricultural products. 14. Huss H. H. Quality and Quality Changes in Fresh Fish / H. H. Huss. – Rome: FAO. 1995. 143 p. – (FAO Fisheries Technical Paper; No. 348).
18. GOCT ISO 14470-2014 Радиационная обработка пищевых продуктов. Требования к разработке, валидации и повседневному контролю процесса облучения пищевых продуктов ионизирующим излучением.
19. GOST ISO 14470-2014 Radiation treatment of food products. Requirements for the development, validation and day-to-day control of the process of food irradiation with ionizing radiation. (In Russ.)
20. Mohamed E.E.E., Hafez A.E.-S.E., Seadawy H.G., et al. Irradiation as a Promising Technology to Improve Bacteriological and Physicochemical Quality of Fish // Microorganisms. 2023. 11(5):1105.
21. Fu Y., et al. Combined effect of irradiation and refrigeration on shelf life of Pacific white shrimp // LWT-Food Science and Technology. 2019. 116:108586.

Материал поступил в редакцию/ Received 20.11.2025
Принят к публикации / Accepted for publication 25.11.2025