

УДК 664.95

Использование методов нетермической обработки для обеспечения качества и безопасности рыбы и других гидробионтов. Обзор предметного поля

Л. Ч. Бурак

Общество с ограниченной ответственностью "БЕЛРОСАКВА", г. Минск, Республика Беларусь;
e-mail: leonidburak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6613-439X>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
06.06.2024;

принята к публикации
19.07.2024

Ключевые слова:

рыба,
рыбная продукция,
обработка,
нетермическая
технология,
сверхвысокое давление,
импульсное поле,
холодная плазма,
микробиологическая
безопасность, качество

Продукты водного происхождения относятся к числу наиболее скоропортящихся. Термическая обработка, включая стерилизацию, сушку и выпаривание, может привести к нежелательным изменениям, таким как снижение их пищевой ценности или ухудшение органолептических показателей. Целью статьи является обзор результатов научных исследований нетермических методов обработки рыбы и других гидробионтов для ингибирования бактерий, обеспечения микробиологической безопасности и сохранения качества. Группы первичных бактерий, вызывающих порчу, различаются у рыб, ракообразных и моллюсков в зависимости от условий и продолжительности хранения. Методы нетермической обработки, такие как сверхвысокое давление, облучение, импульсное электрическое поле и низкотемпературная плазма, показали значительные результаты в подавлении роста микробов и увеличении срока хранения продуктов водного происхождения. Вместе с тем неопределенные параметры обработки и характеристики самой технологии могут привести к таким неблагоприятным последствиям, как окисление липидов и деградация белков во время стерилизации. Нетермическая обработка может использоваться в сочетании с антиоксидантными композитными покрытиями (мембранами) для задержки окисления липидов и белков и улучшения физических, химических и органолептических свойств рыбной продукции. Возможно комбинировать несколько методов нетермической обработки, что позволит компенсировать недостатки одной технологии действием другого способа нетермического воздействия. Дальнейшие научные исследования должны быть направлены на установление оптимальных режимов обработки, возможности комбинированного использования нетермических методов с другими технологиями, такими как упаковка в модифицированной атмосфере, с целью определения механизмов порчи и улучшения качества хранения продуктов водного происхождения, а также дальнейшего промышленного внедрения современных методов обработки. "БЕЛРОСАКВА"

Для цитирования

Бурак Л. Ч. Использование методов нетермической обработки для обеспечения качества и безопасности рыбы и других гидробионтов. Обзор предметного поля. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 3. С. 343–360. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-3-343-360>.

Use of non-thermal treatment methods to ensure the quality and safety of fish and other hydrobionts. Overview of the subject field

Leonid Ch. Burak

Limited Liability Company BELROSAKVA, Minsk, Republic of Belarus;
e-mail: leonidburak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6613-439X>

Article info

Received
06.06.2024;

accepted
19.07.2024

Key words:

fish, fish products,
processing,
non-thermal technology,
ultra-high pressure,
pulsed field,
cold plasma,
microbiological safety,
quality

Abstract

Products of aquatic origin are among the most perishable products. Heat processing, including sterilization, drying and evaporation, can lead to undesirable changes in food products, such as a decrease in their nutritional value or deterioration in organoleptic characteristics. The purpose of the paper is to review the results of scientific research on non-thermal methods of processing fish and other aquatic organisms to inhibit bacteria, ensure microbiological safety and maintain quality. The groups of primary spoilage bacteria vary among fish, crustaceans and mollusks depending on storage conditions and duration. Non-thermal processing methods such as ultra-high pressure, irradiation, pulsed electric field and low-temperature plasma have shown significant results in inhibiting microbial growth and increasing the shelf life of aquatic products. However, uncertain processing parameters and characteristics of the technology itself can lead to adverse effects such as lipid oxidation and protein degradation during sterilization. Non-thermal processing can be used in combination with antioxidant composite coatings (membranes) to delay the oxidation of lipids and proteins and improve the physical, chemical and sensory properties of fish products. It is possible to combine several methods of non-thermal treatment, which will make it possible to compensate for the shortcomings of one technology by the action of another method of non-thermal exposure. Further scientific research should be aimed at establishing optimal processing modes, the possibility of combining non-thermal methods with other technologies, such as modified atmosphere packaging in order to determine the mechanisms of spoilage and improve the quality of storage of products of aquatic origin, as well as further industrial implementation of modern processing methods. BELROSAKVA

For citation

Burak, L. Ch. 2024. Use of non-thermal treatment methods to ensure the quality and safety of fish and other hydrobionts. Overview of the subject field. *Vestnik of MSTU*, 27(3), pp. 343–360. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-3-343-360>.

Введение

Рыба и другие продукты водного происхождения являются жизненно важным источником питания человека, богаты белком, полиненасыщенными жирными кислотами, витаминами и минералами и ценятся потребителями за свой вкус. Они содержат необходимые микроэлементы, такие как докозагексаеновая и эйкозапентаеновая кислоты, которые могут улучшить работу мозга и снизить риск сердечно-сосудистых заболеваний и некоторых видов рака (*Tocher et al., 2019*). Мировое потребление продуктов водного происхождения, включая рыбу, ракообразных и моллюсков, в последние годы резко возросло. В 2020 г. мировое производство достигло 178 млн т, что обеспечивает примерно одну пятую мирового потребления животного белка (Продовольственная и сельскохозяйственная организация [ФАО], 2022)¹. К 2050 г. годовое производство может увеличиться на 21–44 млн т, что составит 12–25 % мяса, необходимого для питания примерно 9,8 млрд человек (*Christopher et al., 2020*). Продукты водного происхождения относятся к числу наиболее скоропортящихся продуктов. Ежегодно миллионы тонн теряются или ухудшаются их питательные свойства, что составляет до 35 % мирового производства, что выше, чем производство зерновых (30 %), масличных культур (20 %), а также мяса и молочных продуктов (20 %) (*David et al., 2023*). Микробный состав продуктов водного происхождения коррелирует с процессами и характеристиками порчи (*Huina et al., 2022*). Первоначально во время хранения микробиологическая обсемененность и ее разнообразие незначительны (*Liang et al., 2022*). По мере увеличения срока хранения такие виды бактерий, как *Shewanella*, *Pseudomonas*, *Photobacterium* и *Brochotrix*, становятся доминирующими (*Huina et al., 2022; Li et al., 2020; Parlapani et al., 2023; Zhuang et al., 2022*), что в конечном итоге приводит к порче. Эти бактерии известны как микроорганизмы, вызывающие порчу (МОП), которые участвуют в расщеплении белков мышц и соединительной ткани на аминокислоты и пептиды, а также в катаболизме нуклеотидов, углеводов и соединений азота. Они производят газы, вызывающие порчу, такие как летучие органические соединения (ЛОС) и биогенные амины (БА), которые играют решающую роль в процессе порчи. Поэтому подавление роста МОП будет способствовать сохранению рыбной продукции и возможности оставаться свежей.

Традиционно водные продукты консервируют путем замораживания, применения химических консервантов и термической обработки (*Lu et al., 2022; Semra et al., 2023*). Хотя эти методы могут предотвратить рост микробов, они также оказывают нежелательное действие. Замораживание может привести к образованию крупных кристаллов льда неправильной формы во внеклеточной области замороженного мяса и мясных продуктов, вызывая повреждение тканей и приводя к потере качества и питательных веществ при оттаивании (*Lu et al., 2022*). Безопасность химических консервантов часто подвергается сомнению из-за их потенциальной токсичности и связи с различными заболеваниями, связанными с регулярным употреблением (*Yan et al., 2023*). Термическая обработка, включая стерилизацию, сушку и выпаривание, может привести к нежелательным изменениям в пищевых продуктах, таким как снижение их пищевой ценности или нежелательные сенсорные свойства (*Odeyemi et al., 2018*). Кроме того, растущий потребительский спрос на ингредиенты с "чистой этикеткой" и натуральные продукты питания способствует необходимости поиска и изучения более устойчивых способов сохранения продуктов питания.

В качестве альтернативы традиционным способам консервирования методы нетермической обработки, такие как обработка сверхвысоким давлением (СВД), облучение, магнитное поле и холодная плазма (ХП), могут минимизировать рост патогенных микроорганизмов и организмов, вызывающих порчу, без изменения свойств пищевых продуктов. Нетермическая обработка эффективно используется для инактивации микробов во фруктовых соках (*Linhares et al., 2020*), пробиотиках (*Asaithambi et al., 2021*), молочных продуктах (*Neokleous et al., 2022*) и мясе (включая птицу, домашний скот и морепродукты) (*Andoni et al., 2021*). Авторы исследования *Zhuang et al. (2021)* продемонстрировали связь между составом микробиоты и порчей рыбы/ракообразных и рассмотрели различные методы контроля качества, в частности консерванты растительного происхождения. *Lin et al. (2022b)* и *Peng et al. (2022)* проанализировали роль микроорганизмов в порче креветок и отметили потенциальные преимущества технологий активных пленок/покрытий и различных методов консервирования (например, упаковка в модифицированной атмосфере (МАР), высокое давление, облучение и холодная плазма).

Основные цели данной обзорной статьи – анализ и характеристика основных видов микроорганизмов порчи рыбы и рыбной продукции, описание процессов микробиологической порчи, принципы и характеристики ингибирования при нетермической обработке и применение нетермической обработки для обеспечения микробиологической безопасности и физико-химического качества рыбной продукции – рыбы, ракообразных и моллюсков.

Материалы и методы

Поиск научной литературы на английском языке по вопросам исследований нетермических методов обработки рыбы и других гидробионтов для ингибирования бактерий, обеспечения микробиологической

¹ The State of World Fisheries and Aquaculture (SOFIA) 2022. URL: https://knowledge4policy.ec.europa.eu/publication/state-world-fisheries-aquaculture-sofia-2022_en.

безопасности и сохранения качества проводили в библиографических базах Scopus, Web of Science. Материалами для исследования послужили 97 статей. В качестве временных рамок для обзора научных публикаций был принят период 2015–2024 гг. Более ранние научные статьи изучали только при отсутствии новых публикаций по теме исследования. При выполнении работы использованы научные методы: поиск и скрининг научной литературы, извлечение данных, их анализ, систематизация и обобщение. Критерии включения и исключения для статей, подлежащих анализу, были следующими.

Критерии включения:

- 1) статья написана в 2015–2024 годы;
- 2) статья соответствует теме исследования;
- 3) типы анализируемых статей – оригинальные исследовательские статьи, обзорные статьи, краткие отчеты.

Критерии исключения:

- 1) статья не соответствует теме данного обзора: не касается тематики нетермической обработки рыбы и других видов продуктов водного происхождения, их влияния на качественные показатели и изменения в процессе обработки;
- 2) статья написана не на английском языке;
- 3) содержание статьи дублируется. Если из разных баз данных или разных электронных библиотечных систем были извлечены повторяющиеся источники, их классифицировали только один раз.

Анализ и систематизация данных:

Результаты анализа были представлены в виде таблиц и диаграмм для визуализации данных. Для обзора предметного поля проведенного исследования использовали алгоритм в соответствии с протоколом PRIZMA.

Результаты и обсуждение

1. Характеристика бактерий порчи рыбы и других гидробионтов

Продукты водного происхождения, такие как рыба и ракообразные, после смерти претерпевают ряд физических и химических изменений (Peng et al., 2022). Во время порчи консистенция становится все мягче, а макромолекулярные соединения, такие как белки, жиры и гликоген, постепенно разлагаются до соединений с более низкой молекулярной массой, которые легкодоступны микроорганизмам. Впоследствии образуются биогенные амины (БА) и соединения с неприятным запахом, характерные для порчи (Samirah et al., 2018). В начале хранения микробный состав мяса рыбы/ракообразных резко меняется, обычно в виде снижения численности и разнообразия микробов (Huang et al., 2022; Zhuang et al., 2021). При увеличении времени хранения происходит рост только некоторых видов бактерий, которые доминируют над общей бактериальной флорой, что приводит к возможной порче (Huang et al., 2022; Zhang et al., 2022). Среди преобладающих микроорганизмов к микроорганизмам порчи (МОП) относятся только те, которые способны продуцировать метаболиты в количествах, достаточных для того, чтобы являться основной причиной порчи. Группы бактерий, вызывающих порчу, зависят от вида продукта, условий обработки, температуры хранения и микробного взаимодействия. МОП может принадлежать только к одному микробному роду или виду, тогда как группы бактерий, вызывающих порчу, могут включать более чем одну микробную группу или род.

1.1. Рыба

Изначальная микробиота рыб обычно включает виды *Pseudomonas*, *Shewanella*, *Psychrobacter*, *Pseudoalteromonas*, *Moraxella*, *Acinetobacter*, *Flavobacterium*, *Vibrio*, *Photobacterium* и *Aeromonas* (Huang et al., 2022; Zhuang et al., 2022). При увеличении срока хранения *Pseudomonas* spp. и виды *Shewanella* зачастую являются доминирующими бактериями, вызывающими порчу. Zhuang et al. (2022) построили путь деградации белка у белого амура (*Stenopharyngodon idella*) и определили характеристики порчи трех доминирующих видов бактерий – *Aeromonas*, *Pseudomonas* и *Shewanella*. Результаты данного исследования показали, что *Shewanella* spp. продемонстрировали самый высокий потенциал порчи среди протестированных бактерий. Huang et al. (2022) установили, что виды *Pseudomonas*, *Acinetobacter* spp. и *Aeromonas* spp. в холодильных хранилищах сурими толстолобика (*Hypophthalmichthys molitrix*) преобладали, *Pseudomonas* spp. является основным агентом деградации белка. Оба вида *Pseudomonas* и *Acinetobacter* spp. продуцировали значительные количества путресцина, тогда как *Aeromonas* spp. производил кадаверин. Zhang et al. (2022) использовали высокопроизводительное секвенирование и газовую хроматографию-масс-спектрометрию для изучения тилапии при охлаждении до температуры 4 °C, установив, что *Shewanella putrefaciens* с ее высокой способностью к адгезии значительно изменяет кишечную микрофлору рыб, что приводит к увеличению количества кишечных бактерий, таких видов как *Plesionomas*, *Macellibacteroides*, *Acinetobacter* и *Legionella*. Это изменение привело к увеличению содержания в рыбе летучих веществ, таких как низшие альдегиды, спирты и кетоны, что вызвало серьезное окисление жирных кислот и усиление рыбного запаха. Значительная способность *Pseudomonas* к порче была также продемонстрирована на тунце (*Thunnus albacares*) (Gadoin

et al., 2022). Другие основные бактерии, вызывающие порчу, включают *Psychrobacter*, *Acinetobacter*, *Aeromonas*, *Carnobacterium* и *Brochothrix thermosphacta* (Huang et al., 2021; 2022).

1.2. Ракообразные

Ракообразные ценятся за свой приятный вкус и пищевую ценность, поскольку они богаты высококачественным белком, незаменимыми аминокислотами, свободными аминокислотами, ненасыщенными жирными кислотами (особенно длинноцепочечными жирными кислотами омега-3) и макроэлементами (Mg^{2+} , Ca^{2+}) (Peng et al., 2022). Однако из-за роста микробов и метаболизма ракообразные подвержены значительной порче. Исходная микробная флора свежего мяса креветок и крабов обычно включает *Sphingomonas*, *Carnobacterium*, *Psychrobacter*, *Streptococcus*, *Photobacterium*, *Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Pseudahrensia*, *Enterobacter*, *Staphylococcus*, *Shewanella* и *Vibrio* (Cen et al., 2021; Jia et al., 2019). Условия хранения существенно влияют на преобладающий вид бактерий порчи креветок в конце хранения. Основные микроорганизмы, вызывающие порчу, также различаются в зависимости от температуры хранения. При температуре 0 °C основными бактериями, вызывающими порчу, являются виды *Pseudomonas*, *Candidatus bacilloplasma* и *Psychromonas* spp. (Jia et al., 2019). При 4 °C преобладают виды *Psychrobacter*, *Pseudomonas*, *Shewanella* и *Acinetobacter* (Cen et al., 2021). У тихоокеанских белых креветок (*Penaeus vannamei*) наблюдается постепенное снижение микробиологической обсемененности при охлаждении (Cen et al., 2021). Lin et al. (2022c) исследовали микроорганизмы, вызывающие порчу, в гепатопанкреасе и мышцах грязевых крабов (*Scylla paramamosain*). Авторы установили, что бактериальные сообщества в мышцах различаются более значительно, чем в гепатопанкреасе, и предположили, что более сложный состав доминирующих бактериальных групп в мышцах может привести к более вариабельной бактериальной реакции.

1.3. Моллюски

Относительные пропорции белков, липидов, углеводов и воды определяют характерную структуру, вкус, текстуру, цвет и пищевую ценность моллюсков. В отличие от большинства рыб и ракообразных, которые практически не содержат углеводов, мясо моллюсков отличается высоким содержанием углеводов и низким содержанием азота. Устрицы имеют короткий срок хранения из-за высокого содержания свободного аммиачного азота и разнообразной микробиоты. У моллюсков основным источником энергии является гликоген, хранящийся в тканях. При переваривании гликогена образуется молочная кислота, которая снижает pH, способствуя избирательной колонизации кислотоустойчивых микроорганизмов, таких как молочнокислые бактерии (МКБ), стрептококки и дрожжи, которые начинают доминировать в популяции. Исходная микробная флора свежих моллюсков включает *Vibrio*, *Shewanella*, *Pseudoalteromonas*, *Psychrobacter*, *Arcobacter*, *Anaplasmataceae* и *Mycobacteriaceae*. Тихоокеанские устрицы (*Crassostrea gigas*), восточные устрицы (*Crassostrea virginica*) и пресноводные моллюски (*Corbicula fluminea*) подвержены воздействию таких видов как *Vibrio*, *Shewanella* и *Pseudoalteromonas*, способных вызывать порчу (Chen et al., 2019; Lin et al., 2022a).

2. Изменения качества продуктов водного происхождения, вызванные бактериями порчи

Рост и метаболизм микроорганизмов являются основными причинами порчи водных продуктов. Во время хранения микробный метаболизм соединений углерода и азота играет значительную роль в порче рыбы и ракообразных (Lou et al., 2021; Zhuang et al., 2021). Следует выделить следующие пути микробного метаболизма: пептиды и аминокислоты, малые молекулы азота, нуклеотиды и углеводы. Протеазы, секретируемые микроорганизмами, гидролизуют белки водных продуктов на пептиды и аминокислоты, вызывая изменения физико-химических свойств, таких как pH, текстура, цвет и водоудерживающая способность (Huang et al., 2021; 2022). Образующиеся аминокислоты и полипептиды транспортируются в бактериальные клетки с последующей деградацией полипептидов до аминокислот (Zhuang et al., 2021). Свободные аминокислоты декарбоксилируются, а альдегиды кетоенилируются, трансаминируются, окисляются или восстанавливаются микробными декарбоксилазами до кетокилот, ненасыщенных жирных кислот, насыщенных жирных кислот, аммиака, кадаверина, путресцина, гистамина, сероводорода, тиолов и индолов. Лизин становится кадаверином; орнитин – путресцином; гистидин становится гистамином; цистеин, метионин и цистин превращаются в сероводород, метилмеркаптан, гексилмеркаптан и так далее, триптофан превращается в индол, и все это способствует возникновению запаха порчи (Huina et al., 2022; Zhang et al., 2022; Zhuang et al., 2022). Аминокислоты, оксид триметиламина (ТМА) и другие азотистые соединения превращаются в ЖК, в том числе ТМА, аденозинтрифосфат (АТФ) и тирамин. Такие виды, как *Shewanella*, *Photobacterium* и *Vibrio*, могут производить ТМА (Rathod et al., 2022). Глюкоза является наиболее часто используемым большинством бактерий углеводным субстратом. Глюкоза и лактоза могут использоваться микроорганизмами, такими как *Shewanella* spp. и виды *Pseudomonads*, для производства ацетата, сукцината, лактата и т. д. (Zhao et al., 2019). Катаболизм АТФ включает деградацию АТФ до аденозиндифосфата, аденозинмонофосфата, инозинмонофосфата (ИМФ), инозина (HxR) и гипоксантина (Hx), а затем до более мелких молекул. Нуклеотиды постепенно расщепляются с образованием IMP, HxR и Hx под действием нуклеотидаз микроорганизмов, таких как *Shewanella* spp. и *Photobacterium* spp. (Huang et al., 2021). Такие

виды, как *Shewanella*, *Pseudomonas*, *Photobacterium* и *Brochothrix*, участвуют во многих метаболических путях, которые приводят к порче водных продуктов. *Shewanella* может регулировать транспорт аминокислот и экспрессию генов, связанных с метаболизмом, а также окислять ТМАО, что приводит к образованию аминов, спиртов, альдегидов, кетонов и сульфидов, и в итоге – к порче водных продуктов (Lou et al., 2021; Zhang et al., 2022). Род грамотрицательных бактерий *Pseudomonas* обладает высокой способностью использовать свободные аминокислоты, образуя при этом летучие вещества, пахучие сульфиды, сложные эфиры и амины (Parlapani et al., 2023). *Photobacterium* spp. обладает необходимыми генами пентозофосфатного пути утилизации углеводов, а также генами, необходимыми для метаболизма глицерина (Hauschild et al., 2022). Таким образом, *Photobacterium* spp. могут использовать углеводы и липиды, способны ускорять преобразование родственных свободных аминокислот, таких как гистамин, кадаверин и путресцин, путем секреции гистидиндекарбоксилазы, лизиндекарбоксилазы и орнитиндекарбоксилазы (Bjornsdottir-Butler et al., 2018).

3. Влияние технологии нетермической обработки на микробиологические и физико-химические показатели качества рыбной продукции

Основная цель использования нетермических способов обработки – снижение негативного воздействия на питательные и органолептические качества пищевых продуктов, а также продление срока их хранения за счет ингибирования или уничтожения микроорганизмов. В ходе многочисленных исследований получены данные, подтверждающие, что нетермические технологии более энергоэффективны и способствуют более эффективному сохранению органолептических показателей и пищевой ценности продуктов, чем традиционные методы обработки. Снижение времени обработки и отрицательного влияния на качество продукта позволяет рассматривать данные технологии в качестве альтернативы традиционным термическим методам (Burak, 2024). Методы нетермической обработки, используемые в настоящее время или разрабатываемые для консервирования водных продуктов, направлены на продление срока их хранения за счет инактивации микроорганизмов, присутствующих в пищевых продуктах. Это такие методы обработки, как технология УНР (Ultra High Pressure) или сверхвысокое давление, облучение, магнитные поля и холодная плазма. В таблице представлен краткий обзор результатов влияния различных методов нетермической обработки на микробиологическую безопасность и физико-химические показатели рыбной продукции.

Таблица. Влияние технологии нетермической стерилизации на микробную безопасность и физико-химические качества рыбной продукции

Table. The influence of non-thermal sterilization technology on microbial safety and physicochemical qualities of fish products

Наименование продукта	Метод обработки и параметры	Условия хранения	Основные результаты обработки	Источник
Устрица (<i>Crassostrea ariakensis</i>)	Сверхвысокое давление (УНР), 200, 400 и 600 МПа, 3 мин	4 °С и 20 °С, 30 дней	Снижение <i>Vibrio vulnificus</i> и <i>Vibrio parahaemolyticus</i> до неопределяемого уровня (400/600 МПа, 3 мин); разница в цвете устриц (значения ΔE*) увеличивается с увеличением давления	Liu et al. (2022)
Гребешок (<i>Mizuhopecten Yessoensis</i>)	УНР, 100/200/300/400/500 МПа, 5 мин	2 ± 2 °С, 28 дней	Сохраняет водоудерживающую способность эндоканнабиноидов гребешка стабильной во время охлаждения, повышает их твердость и снижает упругость; вызывает значительную денатурацию и окисление белка, снижая скорость деградации белка и ингибируя активность эндогенной протеазы (400 и 500 МПа)	Zeng et al. (2022)
Креветка (<i>Penaeus monodon</i>)	УНР, 100/300/500 МПа, 5 мин	Хранение на льду, 28 дней	Значительно снижает начальную TVC более чем на 4 log (КОЕ/г) (свыше 300 МПа), TVC образцов, обработанных с давлением 500 МПа, остается ниже 4 log (КОЕ/г) после 28-дневного охлаждения; с более высокими L* и более высокими значениями твердости после УНР и постепенным снижением эластичности с ростом давления	Chen et al. (2022a)

Скумбрия (<i>Scomber japonicus</i>)	УНР, 200/300/ 400 МПа, 3 мин	4 °С, 20 дней	Обработка способствовала резкому сокращению производства основных компонентов запаха рыбы, ТМА и TVB-N, а также значительному сокращению порчи ЛОС. Увеличение пост- <i>L*</i> яркости, вызванное УНР	<i>Kim et al.</i> (2021)
Окунь (<i>Micropterus salmoides</i>)	Облучение 0/1/3/5 кГр с ⁶⁰ Со-γ	4 °С, 15 дней	КМАФАнМ (1, 3 и 5 кГр) в пределах стандартных значений. Облучение (3 кГр) эффективно подавляло <i>Stenotropomonasmaltophilia</i> ; ингибирование TVB-N и увеличение pH (3 кГр) и концентрации миофибриллярного белка (MPS), способность удерживать воду и гидрофобность поверхности миофибриллярного белка	<i>Li et al.</i> (2022b)
Белый амур (<i>Stenopha-ryngodon idella</i>)	Облучение 2/4/6/8/10 кГр с ⁶⁰ Со-γ	4 °С	Облучение привело к нарушению структуры МПС и МС, уменьшению размера частиц, содержания солерастворимого белка, активности Ca ²⁺ -АТФазы, содержания Т-SH и R-SH; содержание Т-SH и R-SH, а также значения S0-ANS имели тенденцию к снижению (от 4 до 10 кГр), а значение серого цвета электрофоретической полосы становилось меньше и светлее	<i>Shi et al.</i> (2021)
Большеротый окунь (<i>M. salmoides</i>)	Облучение 0/3/6 кГр с ⁶⁰ Со-γ, или 0/3/6 кГр (электронный пучок)	4 °С, 6 дней	Приводит к повышению уровня свободных жирных кислот, первичных и вторичных продуктов окисления липидов; снижает окисление липидов и уменьшает потерю НЖК в мясе большеротого окуня (ЕВ 3 кГр с ⁶⁰ Со 200 Гр/мин)	<i>Lee et al.</i> (2020)
Креветка (<i>Litopenaeus vannamei</i>)	Облучение 0/2,5/5,0/ 7,5/10 кГр (электронный пучок)	2 °С, 23 дня	Меньшая твердость (2,5 кГр), чем в контрольном образце, разрушение текстуры (10 кГр); pH и TVB-N были ниже, чем в контрольном образце	<i>Annamalai et al.</i> (2020)
Карп ферментированный (<i>Cyprinus carpio L.</i>)	Облучение 0/7 кГр с точечным источником ⁶⁰ Со-γ	4 °С, 90 дней	В результате снижается общее содержание ЖК, ингибируется гидролиз белков, высвобождение FAA и образование ЛОС во время хранения	<i>Sun et al.</i> (2021)
Белый амур (<i>C. idella</i>)	Переменное магнитное поле; интенсивность, 2,0 mT	-40 °С, 12 дней	Подавление микробной колонизации филе белого амура при охлаждении; снижение TVB-N, TBARS и характерных аминов, вызывающих порчу, замедленное окисление липидов, потеря сока, потери при приготовлении и изменения pH; сохранение цвета и сенсорного качества	<i>Pan et al.</i> (2023)
Креветка (<i>L. vannamei</i>)	Переменное магнитное поле; интенсивность, 5,0 mT	0 °С, 12 дней	Ингибирует активность гистоновых протеаз В, D, Н и L, содержание карбонила и дитиозина, а также деградацию белков; повышенная твердость, жевательная способность <i>a*</i> , <i>b*</i> и снижение вододерживающей способности	<i>Zhu et al.</i> (2022)

Серебряный помфрет (<i>Pampus argenteus</i>)	Плазма. Обработка (UPFL), сочетающее US (ультразвук) с PFL (плазмо-активированная жидкость)	4 °C в течение 15 дней	Значительное снижение TVC, видов <i>Pseudomonas</i> , <i>Enterobacteriaceae</i> , бактерий, продуцирующих H ₂ S, молочнокислых бактерий	<i>Esau et al.</i> (2022)
Карп (<i>Cyprinus carpio</i>)	Активированная плазмой вода, SDW, активированная RAW120, на 1,5, 3,0, 4,5 или 6,0 мин	20 °C; 30 °C для микробного анализа	Увеличены значения L* и уменьшены значения a*, отсутствуют существенные различия значений b* и твердости, упругости, адгезии и когезионности; Значительное увеличение уровня окисления липидов и снижение pH	<i>Liu et al.</i> (2021)

Примечание. Обозначения: КМАФАнМ – количество аэробных колоний; LAB – молочнокислые бактерии; TBARS – реагенты тиобарбитуровой кислоты; ТМА – триметиламин; TVB-N – общее количество летучих оснований азота; TVC – общее количество жизнеспособных микроорганизмов; UHP – сверхвысокое давление; ЛОС – летучее органическое соединение.

3.1. Сверхвысокое гидростатическое давление (UHP)

Сверхвысокое гидростатическое давление, также известное как обработка UHP, сохраняет присущий цвет, вкус, питательные вещества и текстуру пищевых продуктов, обеспечивая при этом безопасность пищевых продуктов, продлевая срок годности и сохраняя качественные характеристики (*Bozaris et al., 2021; Burak, 2024*). В этом методе применяется определенный диапазон давления (100–1000 МПа) в течение заданного периода времени. Технология UHP изменяет морфологическую структуру микробных клеток, разрушая нековалентные связи и повреждая клеточные мембраны, что приводит к утечке клеточного содержимого, прекращению генетической репликации, необратимой инактивации ферментов и гибели микробов. Потеря активности фермента или функциональные изменения могут быть результатом изменений активного центра или денатурации белка. UHP значительно снижает общее количество бактерий в водных продуктах и эффективно подавляет SSO. В исследовании *de Alba et al. (2019)* показано, что при обработке <500 МПа в течение 2 или 5 мин общее количество жизнеспособных клеток (TVC) было на 1,66 и 2,48 log (КОЕ/г) ниже по сравнению с контрольной группой, где показатель 4,17 log (КОЕ/г). H₂S-продуцирующие бактерии не обнаружены (<1 log КОЕ/г) после обработки по сравнению с установленным количеством 2,53 log (КОЕ/г) в контрольной группе. Обработка UHP также подавляла психротрофные бактерии во время хранения. При воздействии давлением 300 и 400 МПа количество психротрофных бактерий в образцах тилапии снизилось на 1,11 и 1,15 log (КОЕ/г) соответственно по сравнению с контрольной группой (*Suemitsu et al., 2019*). Кроме того, UHP эффективно ингибировало гистаминообразующие бактерии (HFB), такие как *Morganella morganii* и *Photobacterium phosphoreum*. *Lee et al. (2020)* исследовали влияние UHP на эти HFB у фаршированного тунца с помощью TVC и сканирующей электронной микроскопии, установив, что UHP может вызывать морфологические изменения клеток и инактивировать HFB. UHP также ингибировало микроорганизмы, вызывающие порчу, такие как *Vibrio* spp. (*Vibrio vulnificus* и *Vibrio parahaemolyticus*), *Shewanella* spp. (особенно *S. putrefaciens*) и *Pseudomonas* spp. в различных морепродуктах, таких как устрицы (*Crassostrea ariakensis*), скумбрия (*Scomber japonicus*) и раки с красными клешнями (*Cherax Quadricarinatus*) (*Kim et al., 2021; Lin et al., 2021; Liu et al., 2022*). Эффективность UHP на микробиоту была подтверждена на тунце (*Tsai et al., 2022*), гребешке (*Mizuhopecten yessoensis*) (*Chen et al., 2023*) и белом амуре (*Yu et al., 2018*).

Качество продуктов водного происхождения (внешний вид, текстура и т. д.) может улучшаться или ухудшаться в зависимости от применяемого уровня сверхвысокого давления. Обработка оптимальными параметрами UHP способствует сохранению органолептических свойств в процессе хранения. Цвет (L*, a*, b*) является важнейшим показателем свежести. Многочисленные исследования доказали, что обработка UHP может повысить яркость (L*) морепродуктов (*Chen et al., 2022b; de Alba et al., 2019; Kim et al., 2021; Tsai et al., 2022*). *Tsai et al. (2022)* заметили, что желтизна (b*), белизна (W*) и цветовая разница (ΔE*) тунца увеличиваются с увеличением величины сверхвысокого давления. *Liu et al. (2022)* сообщили об аналогичных тенденциях ΔE* для устриц после обработки UHP. *Zeng et al. (2022)* применили UHP (500 МПа) к гребешкам и обнаружили, что обработка позволяет сохранить водоудерживающую способность, повышает твердость, снижает упругость, вызывает значительную денатурацию и окисление белка, снижает скорость деградации белка, ингибирует активность эндогенных протеаз и предотвращает ухудшение текстуры во время охлаждения. *Tsironi et al. (2019)* обработали морского окуня (*Dicentrarchus labrax*) сверхвысоким давлением 600 МПа, что привело к увеличению веса и твердости филе, при этом волокна стали слитыми и более компактными по сравнению с необработанной контрольной группой. Кроме того, обработка позволила увеличить срок

хранения филе, обработанного УНР, до 2 месяцев по сравнению с 11 днями для контрольных образцов. Обработка УНР может значительно снизить накопление общего летучего основного азота (TVB-N) и ТМА, тем самым сводя к минимуму порчу микробиоты (Chen et al., 2022b).

Воздействие УНР также может ингибировать выработку гистамина. После обработки УНР тунца (200, 300, 400, 500 и 600 МПа в течение 5 мин) при 4 °С уровень гистамина, выявленный на 15-е сутки хранения, составил в контрольном образце 2,5 мг/100 г, а в обработанных 200 МПа только 0,5 мг/100 г. Использование УНР (> 200 МПа) для мяса тунца способно эффективно ингибировать выработку гистамина (Tsai et al., 2022), вероятно, из-за подавления роста продуцирующих гистамин микроорганизмов, вызывающих порчу (Lee et al., 2020). Обработка УНР также может ингибировать деградацию АТФ и распад аминокислот. Xu et al. (2020) объединили обработку 0,2 % коричневого альдегида с УНР (200 МПа в течение 10 мин) филе оливковой камбалы, хранившемся при 4 °С. Результаты показали значительное снижение содержания нежелательных вкусовых соединений, таких как Нх, ТМА и горьких аминокислот, при этом происходило накопление желательных вкусовых соединений, таких как ИМФ и аминокислот с благоприятным вкусом. Yu et al. (2018) провели обработку УНР филе белого амура (200, 300, 400, 500 и 600 МПа в течение 15 мин). Результаты исследования показали, что обработка от 400 до 600 МПа в течение 15 мин значительно ингибировала активность тканевых протеаз В и D, а также коллагеназа.

3.2. Облучение

Облучение – это нетепловая технология, в которой для взаимодействия с веществами используются гамма-лучи, испускаемые радиоизотопами, такими как кобальт (^{60}Co) и цезий (^{137}Cs), или ионизирующее излучение, создаваемое пучками высокоэнергетических электронов (ЭП). Это взаимодействие приводит к физическим, химическим и биологическим процессам, которые обеспечивают безопасность пищевых продуктов и продлевают срок их хранения (Wei et al., 2022). ЭП и рентгеновское облучение не требуют радиоактивных изотопов для стерилизации и эффективно подавляют бактерии, не вызывая загрязнения (Asaithambi et al., 2021; Wei et al., 2022). Патогенные микроорганизмы чувствительны к облучению главным образом из-за разрывов цепей ДНК, индуцированных свободным радикалом ОН. Радиация также повреждает клеточные мембраны и другие структуры, вызывая сублетальные повреждения живых клеток, т. е. потерю физиологических функций (Gautam et al., 2021).

3.2.1. Влияние на микробиологическую безопасность и физико-химические показатели

Облучение доказало свою эффективность в инактивации микроорганизмов в водных продуктах. Mehrzadeh et al. (2021) показали, что обработка облучением белых креветок (*Metapenaeus affinis*) привела к значительному снижению TVC, чем в необработанных образцах, на 15-й день со снижением как минимум на 6 log (КОЕ/г) при дозе 7 кГр. Sun et al. (2021) сообщили об аналогичной эффективности по инаktivации TVC. Виды *Pseudomonas*, H_2S -продуцирующие бактерии, *B. thermosphacta* и психрофильные бактерии являются доминирующими организмами, вызывающими порчу при хранении водных продуктов. Annamalai et al. (2020) провели облучение обезглавленных белых креветок (*Litopenaeus vannamei*) дозой 0, 2,5, 5,0, 7,5 и 10 кГр и хранили их при 2 °С в течение 23 дней. Количество психрофильных бактерий, *Pseudomonas* spp., H_2S -продуцирующих бактерий, *B. thermosphacta* и *Lactobacillus* было значительно ниже у облученных креветок, чем в контрольной группе. В необработанных образцах *Pseudomonas* spp. достигали значения 5,25 log (КОЕ/г) к 12 дню, тогда как продукция, облученная дозами 2,5 и 5,0 кГр, достигла значения 5,30 и 5,06 log (КОЕ/г) соответственно только к 15 дню.

Облучение изменяет состав микрофлоры и эффективно уменьшает большинство бактерий, вызывающих порчу, в частности *Shewanella* spp. Yu et al. (2022a) исследовали морские креветки (*Solenocera melanthero*), которые были облучены дозой 0, 2, 4, 6, 8 и 10 кГр. Установлено, что облучение в дозе 2 кГр уничтожает большинство микроорганизмов, а облучение в дозе 6 кГр эффективно уничтожает виды *Shewanella*. Кроме того, обработка 3 кГр эффективно подавляла рост *Stenotropomonasmaltophilia*, основной бактерии, вызывающей порчу морского окуня (Li et al., 2022b). Sun et al. (2021) облучали ферментированного карпа (*Cyprinus carpio* L.) при дозе 7 кГр, что привело к снижению общего количества жизнеспособных бактерий на 4,67 log (КОЕ/г) по сравнению с контрольной группой, без роста колиформ и видов *Pseudomonas* во время хранения, что указывает на потенциальную возможность облучения ингибировать рост бактерий в предварительно приготовленных посудах.

Xu et al. (2021) показали, что более низкие дозы облучения (1 и 3 кГр) могут значительно продлить срок хранения филе морского окуня, сохраняя при этом твердость и жевательную способность во время хранения. Yu et al. (2022a) установили, что уровни облучения >6 кГр могут нарушить мышечную структуру и ускорить порчу креветок. Креветки, обработанные облучением 10 кГр, показали меньшую твердость и жевательную способность, чем другие облученные группы продуктов, после 15 дней хранения в холодильнике при температуре 2 °С (Annamalai et al., 2020). Высокие уровни облучения, такие как γ -излучение 7 кГр, могут значительно увеличивать значения L^* и b^* у карпа (Sun et al., 2021). Более низкие уровни облучения оказали незначительное влияние на текстуру и внешний вид рыбной продукции.

Mehrzadeh et al. (2021) подвергли белых креветок облучению в дозах 0, 1, 3, 5 и 7 кГр и обнаружили, что по сравнению с контрольным образцом облучение снизило уровни тиобарбитуровой кислоты (ТБК) и TVB-N во время хранения, при этом снижение увеличивается с увеличением дозы радиации.

Высокоинтенсивное облучение может повлечь ухудшение качества. *Lee et al.* (2020) использовали $^{27}\text{Co}^{60}$ (0, 3 и 6 кГр) и ЭБ (0, 3 и 6 кГр) на большеротом окуне (*Micropterus salmoides*) и заметили, что окисление липидов увеличивается при более высоких дозах радиации, особенно при облучении ^{60}Co , которое оказывало более выраженное влияние на окисление липидов, чем облучение ЭБ. Облучение дозой 6 кГр привело к увеличению содержания свободных жирных кислот, а также продуктов первичного и вторичного окисления липидов у большеротого окуня. Присутствие воды может ускорить окисление липидов, вызванное ^{60}Co в мясе рыбы; однако в группе, облученной дозой 3 кГр, наблюдалось снижение окисления липидов и сохранение ненасыщенных жирных кислот по сравнению с группой, получавшей дозу 6 кГр.

3.3. Магнитное поле

Магнитные поля можно разделить на статические или динамические в зависимости от их интенсивности и направленности действия (*Lin et al.*, 2021). Различные типы магнитных полей и их физические параметры (сила, однородность, направленность и продолжительность) могут вызывать различные биологические изменения. Например, слабые магнитные поля имеют тенденцию активировать и способствовать росту микробов, тогда как более сильные импульсные магнитные поля (PMF) могут уничтожать микробы (*Wen et al.*, 2021). Механизмы, лежащие в основе микробной инактивации, включают ряд электромагнитных эффектов, генерируемых PMF (в основном индуцированный ток, сила Лоренца, колебательные движения и ионизация), которые приводят к клеточным изменениям, влияющим на биохимический и генетический метаболизм микроорганизмов, что в конечном итоге вызывает гибель микробов (*Lin et al.*, 2021).

Магнитные поля эффективно подавляют микроорганизмы при консервировании водных продуктов. Общее количество бактерий в филе белого амура из контрольной группы составляло примерно 6,0 log (КОЕ/г) к 5-му дню хранения и достигало 8,3 log (КОЕ/г) к 13-му дню. Напротив, филе белого амура, подвергнутое воздействию 2 мТ переменного магнитного поля, показало 6,0 log (КОЕ/г) к 10-му дню. К концу хранения (13-й день) общее количество бактерий в этих филе снизилось на 1,20 log (КОЕ/г) по сравнению с контрольной группой (*Pan et al.*, 2023). Замораживание с помощью магнитного поля способно повысить качество замороженных мясных продуктов за счет эффективного ускорения скорости замораживания и образования более мелких внутриклеточных кристаллов льда для лучшей сохранности (*Lu et al.*, 2022). Соответствующая сила магнитного поля может свести к минимуму повреждение мышечной ткани кристаллами льда и сохранить качества продукта. *Zhou et al.* (2023) исследовали влияние замораживания с помощью магнитного поля на образование и качество кристаллов льда у золотого помпано (*Trachinotus ovatus*). Результаты показали, что подходящая напряженность магнитного поля (20 мТ) предотвращает образование крупных кристаллов льда, способствует равномерному распределению кристаллов льда и уменьшает механическое повреждение мышечной ткани.

В сочетании с охлаждением магнитные поля могут помочь предотвратить окисление липидов и деградацию белков в водных продуктах. *Zhu et al.* (2022) подвергли креветок в вакуумной упаковке воздействию сверхвысокого давления при давлении 200 и 300 МПа в течение 5 мин с последующим хранением в магнитном поле напряженностью 5 мТ в течение 12 дней. Авторы установили, что окисление липидов значительно ингибировалось во время хранения, активность тканевых протеаз снижалась, окислительная деградация белков задерживалась, а ухудшение текстуры и цвета мышц было незначительным, что привело к увеличению срока хранения креветок как минимум на 2 дня.

Однако исследования по обработке охлажденных водных продуктов магнитным полем ограничены, а механизмы ингибирования остаются неясными. Протеомика, пептидомика и метаболомика могут помочь выяснить влияние магнитных полей на качество водных продуктов.

3.4. Холодная плазма (СР)

Холодная плазма – это четвертое состояние материи или "состояние плазмы"; материя состоит из свободных электронов и заряженных ионов. Плазму можно генерировать путем возбуждения нейтральных газов высоким напряжением, превращая вещество в плазму с достаточной энергией. Обработка СР – это новый нетермический процесс, используемый для консервирования пищевых продуктов. При этом производятся фотоэлектроны, ионы и активные свободные радикалы вокруг пищевой среды, которые контактируют с микробными поверхностями, вызывая окисление микробных нуклеиновых кислот, и приводят к микробной инактивации и разрушению клеток, что эффективно стерилизует пищевой продукт (*Jadhav et al.*, 2021). СР имеет такие преимущества, как работа при низких температурах, отсутствие токсичных побочных продуктов и минимальный ущерб качеству пищевых продуктов. *Zhang et al.* (2022) объяснили процесс воздействия СР травлением клеток, перфорацией клеточной мембраны, электростатическими помехами и макромолекулярным окислением. Потенциальные механизмы микробного ингибирования СР включают повреждение ДНК и перекисное окисление липидов.

Плазменная обработка является перспективным методом обработки и сохранения водных продуктов. Способность плазмы ингибировать TVC была обнаружена у серебряного помфрета (*Pampus argenteus*) (Esua et al., 2022), морского леща (*Sparus aurata*) (Giannoglou et al., 2021), креветок (*Metapenaeus ensis*) (Liao et al., 2018) и синего краба-плавуна (*Portunus Armatus*) (Olatunde et al., 2021). Обработка плазмой также может подавлять рост таких видов, как *Pseudomonas*, *Psychrophilic* spp. и *Enterobacteriaceae* spp., во время консервирования рыбной продукции. Olatunde et al. (2018) установили, что у азиатского морского окуня (*Latescalcarifer*) общее количество термофильных бактерий, криофильных бактерий, *Pseudomonas* spp., LAB и *Enterobacteriaceae* spp. обработанных напряжением 80 кВ в течение 5 мин, было достоверно ниже, чем в контрольной группе. Общее количество термофильных бактерий в обработанной группе продуктов было как минимум на 1 log (КОЕ/г) ниже, чем в контрольной группе, что продлевало срок хранения более чем на 18 дней при 4 °С. Olatunde et al. (2021) в исследовании с синим плавающим крабом обнаружили, что после 10-минутной обработки плазмой при 80 кВ количество *Psychrophilic*, *Enterobacteriaceae* и *Pseudomonas* spp. снизилось с $3,5 \pm 0,2$, $2,7 \pm 0,8$, $2,2 \pm 0,3$ и $2,5 \pm 0,5$ log (КОЕ/г) соответственно до уровня ниже уровня обнаружения. Количество микроорганизмов в группах, обработанных плазмой, было ниже, чем в контрольных группах при хранении в холодильнике на срок до 12 дней, при этом более длительное время обработки способствовало большей эффективности. Обработанное свежее филе тилапии при охлаждении показало, что *Pseudomonas*, бактерии, продуцирующие H₂S, и виды *Enterobacteriaceae* ингибировались при хранении, а после обработки при 70 кВ в течение 5 мин и хранения в течение 12 суток уровни TVB, *Pseudomonas* spp. и *Enterobacteriaceae* spp. в филе тилапии составили 7,2, 7,0 и 4,2 log (КОЕ/г) соответственно, что было значительно ниже, чем в контрольной группе (Wang et al., 2022). Обработка плазмой также может ингибировать рост видов *Shewanella*. Liu et al. (2021) проводили для обработки активированную плазмой воду в течение 6 мин и достигли максимального снижения на 1,0 log (КОЕ/г) у *S. Putrefaciens* по сравнению с контролем. Исследование Esua et al. (2021) на белом амуре показало, что плазма при 70 В значительно снижает количество микробной обсемененности *S. Putrefaciens* и *Salmonella typhimurium*. Количество *S. Putrefaciens* и *S. Typhimurium* в начале составляло 5,9 и 6,0 log (КОЕ/г) соответственно, а после обработки значительно снижалось до 1,6 и 1,4 log (КОЕ/г). Возможно, плазменная технология способна снизить выработку гистамина за счет подавления жизнеспособности микроорганизмов, продуцирующих гистамин, хотя подтверждение в научной литературе в этой области исследований пока отсутствует.

Albertos et al. (2019) использовали обработку сельди плазмой атмосферного давления (технология атмосферной плазмы) при 70 и 80 кВ в течение 5 мин (*Clupea harengus*). Это позволило сохранить качество значений *L**, *a** и *b**, но при напряжении 80 кВ наблюдалось неблагоприятное воздействие на цвет. Giannoglou et al. (2021) применили низкоинтенсивную расширенную обработку СР напряжением 3 кВ в течение 15 мин на луциане и обнаружили, что это увеличило значение *L** луциана с небольшим изменением твердости, а также значений *a** и *b**, при этом существенно был снижен рыбный привкус при хранении. Situ et al. (2023) исследовали влияние различной мощности разряда и времени обработки на качество охлажденного помфрета золотого (*T. ovatus*), используя постоянную обработку СР в течение 90 с при различной мощности разряда (0, 20, 30, 40, 50, 60, и 70 Вт) и постоянной мощностью разряда 40 Вт с различным временем воздействия (0, 30, 60, 90, 150, 210 и 270 с). Когда мощность обработки СР была постоянной и составляла 40 Вт, твердость и адгезия существенно увеличивались с увеличением времени обработки; однако когда время обработки СР превышало 60 с как твердость, так и когезионность снижались.

Esua et al. (2022) исследовали предварительно обработанный серебряный помфрет с использованием функционализированной плазмой жидкости (при 70 кВ) в сочетании с ультразвуком (US) (частота 40 кГц, мощность 500 Вт, акустическая интенсивность 15,35 Вт/л, продолжительность 5 мин) перед вакуумной упаковкой и хранением при 4 °С в течение 15 дней. Измерения проводились с интервалом в 3 дня. В соответствии с микробиологической оценкой качества обработка значительно снизила деградацию миогенного фибрина, потерю капель, структурную потерю, окисление липидов, образование летучих соединений и свободных жирных кислот, а также пролиферацию микробов, эффективно продлевая срок хранения на 6 дней. Zowelm et al. (2019) использовали СР для обработки белых креветок в течение 45, 90 и 150 с. По сравнению с контрольной группой обработка СР в течение 90 с обеспечила сохранение pH, содержание TVB-N, реактивных веществ ТВА (TBARS), свободных жирных кислот и перекисное число, тогда как флуоресцентные соединения значительно увеличивались. СР снизила относительную активность полифенолоксидазы, а также фосфолипазы и липазы, что, в свою очередь, снижало окисление липидов у креветок. Длительное воздействие СР в течение 150 с способно снизить активность фермента до 50 %. Одна и та же интенсивность обработки привела к разным эффектам при использовании разных водных продуктов. У азиатского морского окуня обработка СР 80 кВ в течение 5 мин имела явный ингибирующий эффект на увеличение TVB-N, ТМА и ТВА во время хранения (Olatunde et al., 2018). Однако исследования с синим плавательным крабом показали, что при той же обработке TBARS и перекисное число были выше, чем в контрольной группе во время хранения, что указывает на усиление окисления липопротеинов (Olatunde et al., 2021). Результаты других исследований также показали, что СР приводит к окислению липидов (Albertos et al., 2019; Giannoglou et al., 2021; Liu et al., 2021).

3.5. Другие методы нетермической обработки

Импульсное электрическое поле (PEF) – это нетермический метод, при котором кратковременные импульсы высокого напряжения применяются к продуктам питания, помещенным между двумя электродами. Воздействие PEF инактивирует микроорганизмы с минимальным ущербом для качества пищевых продуктов. Принято считать, что основным механизмом инактивации микроорганизмов с помощью PEF является электропорация клеточных мембран. *Anggo et al.* (2020) оценили влияние PEF на мясо карпа, обнаружив, что общее количество колоний (ТРС) снизилось с 4,60 до 3,76 log (КОЕ/г) после применения PEF, причем большее снижение наблюдалось при увеличении напряжения с 30 до 90 кВ. PEF значительно инактивировало микроорганизмы, вызывающие порчу креветок; наибольшее количество мезофильных и психрофильных микроорганизмов было снижено при применении PEF (15 кВ/см, 600 импульсов), что способствовало низкой микробной нагрузке до конца хранения (4,58 log (КОЕ/г)) (*Shiekh et al.*, 2020). *Luo et al.* (2019) изучали влияние обработки PEF (0,66, 1,38 и 2,00 кВ/см, 50 Гц) на физико-химические свойства новозеландского морского ушка и не установили существенных различий в цвете, текстуре, окислении липидов, свободных аминокислотах и жирных кислотах, содержании кислоты между обработанными PEF и необработанными образцами.

Ультразвук (US) – это метод нетермической обработки, в котором используются звуковые волны с частотой около 20 кГц. Ультразвук высокой интенсивности (20–500 кГц) широко применяется в пищевой промышленности благодаря его механическим, термическим и химическим эффектам, возникающим во время акустической кавитации. Эти эффекты могут вызвать разрыв ДНК и инактивацию ферментов в микробных клетках и привести к разрыву клеточной стенки, что приводит к гибели клеток (*Nunes et al.*, 2022). Рыба, обработанная US, демонстрировала значительно более низкие уровни окисления липидов и деградации белка. Обработка ультразвуком также ингибировала рост *Pseudomonas* spp. и активность эндогенных ферментов (*Li et al.*, 2022a). Действием US эффективно инактивировали *V. parahaemolyticus* в сырых устрицах; после US-обработки 7,5 Вт/мл в течение 12,5 мин уровни *V. parahaemolyticus* снизились на 3,13 log (КОЕ/г). Обработка также значительно подавляла увеличение общего количества аэробных бактерий и общего летучего основного азота, ингибировала процессы окисления липидов и замедляла изменение цвета устриц во время хранения (*Ma et al.*, 2023).

3.6. Преимущества и недостатки нетермических методов обработки

Все методы нетермической обработки, проанализированные в данном обзоре, продемонстрировали эффективность в контроле роста микроорганизмов, вызывающих порчу (МОП) в продуктах водного происхождения при сохранении их питательных и сенсорных характеристик. Однако эти технологии также имеют некоторые ограничения. UHP эффективно подавляет МОП во время хранения водных продуктов, но может вызывать окисление липидов и значительные изменения цвета и текстуры из-за высокого давления. Барьерная технология (технология Hurdle) в сочетании с активными пленками и съедобными покрытиями может повысить безопасность и качество продуктов из водного сырья. Сочетание сверхвысокого давления UHP (250 МПа, 15 мин) и пищевой пленки (желатин-хитозан-эфирное масло гвоздики) существенно усиливает антибактериальный эффект карпаччо из лосося. Общее количество бактерий, люминесцентных бактерий, организмов, продуцирующих H₂S, псевдомонад и энтеробактерий, оставалось постоянным или ниже предела обнаружения в течение 11-дневного периода хранения (*Gómez-Estaca et al.*, 2018). Сочетание упаковки в модифицированной среде (MAP) с атмосферой, обогащенной CO₂, и UHP (150 МПа, 5 мин) ингибировало окисление филе лосося (*Zhang et al.*, 2021). Облучение дает такие преимущества, как низкая стоимость, отсутствие загрязнения окружающей среды и эффективные антибактериальные свойства. Однако его воздействие может вызывать побочные эффекты, включая окисление белков, снижение вододерживающей способности и ухудшение чувствительности. Совместное использование облучения с антиоксидантами может эффективно задерживать окисление липидов и белков, улучшая физические, химические и сенсорные качества водных продуктов (*Wei et al.*, 2022).

CP – это технология с низкотемпературными свойствами и отсутствием химических веществ. После обработки CP образуются активные формы кислорода/азота, включая синглетный кислород, супероксид-анион и перекись водорода. Эти свободные радикалы убивают микроорганизмы, вызывающие порчу, но также могут стимулировать окисление липидов в водных продуктах. Хитоолигосахариды, содержащие группы NH₂ и OH, могут служить донорами водорода, блокируя процесс окисления липидов. Высоковольтная атмосферная холодная плазма CP (HV-ACP) в сочетании с хитоолигосахаридами (0,1 г/100 г) была эффективно использована для продления срока годности ломтиков азиатского морского окуня при хранении в холодильнике за счет уменьшения размножения микроорганизмов и окисления липидов. Хитоолигосахариды (0,1 г/100 г) напрямую снижали окисление липидов и белков, вызванное HV-ACP (*Singh et al.*, 2020). PMF имеют ряд преимуществ, в том числе глубокое проникновение в пищевые материалы, бесконтактную обработку, простоту в использовании после обеззараживания, низкое энергопотребление и мгновенную стерилизацию. Однако исследования по обработке охлажденных водных продуктов магнитным полем ограничены, а механизм ингибирования остается неясным. Проблемы включают зачастую слишком высокое приложенное напряжение разряда и ограниченную эффективность в отношении спор (*Lina et al.*, 2021).

PEF имеют такие преимущества, как более низкие температуры обработки, более короткое время обработки и увеличенный срок хранения без химических остатков или загрязнения окружающей среды. Однако было обнаружено, что обработка PEF увеличивает окисление липидов и белков из-за эффекта электропорации, что потенциально приводит к ухудшению текстуры и цвета. Сочетание натуральных экстрактов с нетермической обработкой может стать инновационным подходом к сохранению качества водных продуктов. PEF/PMF может выступать в качестве предварительной обработки, создавая небольшие отверстия, через которые натуральные экстракты могут более эффективно проникать в обработанные образцы. Окисление, вызванное PEF, может привести к появлению неприятных запахов из-за образования альдегидов, кетонов и спиртов; однако добавление натуральных растительных экстрактов может смягчить ухудшение профиля жирных кислот. PEF в сочетании с экстрактом листьев чамуанга (1 %) эффективно замедляет окисление липидов у тихоокеанских белых креветок, а также приводит к меньшему увеличению количества *Pseudomonas* spp., *Enterobacteriaceae* spp. и H₂S-продуцирующих бактерий по сравнению с контрольной группой и другими обработанными образцами (Shiekh et al., 2021). US можно охарактеризовать как нетоксичный метод с низкой стоимостью и высокой проницаемостью. Хотя ультразвук низкой интенсивностью сам по себе малоэффективен, а увеличение интенсивности может привести к перерасходу энергии и потенциальному ущербу качеству рыбной продукции, то для устранения данных проблем целесообразно сочетание US с другими технологиями, такими как электролиз воды, съедобное покрытие и импульсный свет.

3.7. Перспективы использования нетермических технологий

Методы нетермической обработки, такие как сверхвысокое давление, облучение, PMF и низкотемпературная плазма, показали значительные результаты в подавлении роста микробов и увеличении срока хранения рыбы и других гидробионтов. Вместе с тем, как уже отмечалось, эти методы могут отрицательно повлиять на качество рыбной продукции, включая окисление липидов, деградацию белков, изменения физико-химических свойств и сенсорных характеристик, когда используются неоптимизированные параметры обработки. С целью снижения негативного воздействия можно предложить следующие пути решения:

- нетермическая обработка может использоваться в сочетании с антиоксидантными/биологическими композитными покрытиями (мембранами) для задержки окисления липидов и белков и улучшения физических, химических и органолептических свойств продуктов водного происхождения;
- возможно комбинировать несколько методов нетермической обработки, например, UHP с низкотемпературной плазмой и US с технологиями UHP, что позволит компенсировать недостатки одной из технологий.

Влияние нетермической обработки различной интенсивности на окисление липидов, деградацию и окисление белков, а также физические и органолептические свойства является значительным. Механизмы, связанные с интенсивностью нетермической обработки и изменением качества рыбы и рыбной продукции, конкретно не определены. Поэтому необходимо стандартизировать интенсивность нетермической обработки в соответствии с реальными полевыми условиями и конкретными водными видами и продуктами.

На процесс порчи продуктов водного происхождения значительное влияние оказывает состав их микробиоты. Потенциал порчи и метаболические характеристики различных микроорганизмов сильно различаются. Необходимо проведение дополнительных исследований для определения МОП различных видов и продуктов. Протеомика, пептидомика и метаболомика могут дать более четкое представление о микробных ферментах, биохимических реакциях и метаболических путях, связанных с порчей водных продуктов, путем идентификации характерных продуктов порчи, таких как ЛОС, специфические аминокислоты, амины и белки процесса порчи, а также выявить механизмы ухудшения качества, вызванные микроорганизмами, вызывающими порчу. Кроме того, геномные методы, включая метагеномику и метатранскриптомику, дают комплексное представление о функциональных характеристиках всего микробного сообщества в водных продуктах и позволяют анализировать потенциальные взаимодействия между различными микроорганизмами.

В целом, нетермическую обработку можно интегрировать с различными технологиями, чтобы максимально улучшить сохранность рыбной продукции. Рабочие параметры нетермической обработки следует тщательно контролировать, чтобы максимально снизить любые неблагоприятные последствия.

Заключение

Порча рыбы и других гидробионтов во время хранения неизбежна, и хотя многочисленные исследования раскрывают механизмы порчи (например, деградация белков микроорганизмами, окисление липидов, наличие жирных кислот и образование ЛОС, которые приводят к порче и неприятным запахам), некоторые аспекты этих процессов остаются неопределенными. Нетермические методы обработки – это новые современные технологии, которые могут способствовать сохранению рыбы и рыбной продукции за счет снижения микробиологической обсемененности, сохраняя при этом физико-химические показатели. Однако неопределенные параметры и характеристики самой технологии могут привести к таким неблагоприятным последствиям, как окисление липидов и деградация белков во время стерилизации. С целью снижения

негативного воздействия методы нетермической стерилизации целесообразно комбинировать с антиоксидантными/биокомпозитными покрытиями/MAP, а также с гистологическими методами. Дальнейшие научные исследования должны быть направлены на использование барьерных технологий, что будет способствовать сохранению качества рыбной продукции и широкому промышленному внедрению нетермических технологий консервирования.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

References

- Albertos, I., Martin-Diana, A. B., Cullen, P. J., Tiwari, B. K. et al. 2019. Shelf-life extension of herring (*Clupea harengus*) using in-package atmospheric plasma technology. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 53, pp. 85–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.09.010>.
- Alotaibi, S., Tahergerabi, R. 2018. Development of a sweet potato starch-based coating and its effect on quality attributes of shrimp during refrigerated storage. *LWT*, 88, pp. 203–209. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms10040773>.
- Andoni, E., Ozuni, E., Bijo, B., Shehu, F. et al. 2021. Efficacy of non-thermal processing methods to prevent fish spoilage. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 30(2), pp. 228–245. DOI: <https://doi.org/10.1080/10498850.2020.1866131>.
- Anggo, A. D., Suharto, S. 2020. The effect of high voltage electric shock on the quality attribute of carp fish (*Cyprinus carpio*) meat. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 530. Article number: 012019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/530/1/012019>.
- Annamalai, J., Sivam, V., Unnikrishnan, P., Sivasankara, S. K. et al. 2020. Effect of electron beam irradiation on the biochemical, microbiological and sensory quality of *Litopenaeus vannamei* during chilled storage. *Journal of Food Science and Technology*, 57, pp. 2150–2158. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04250-7>.
- Asaithambi, N., Singh, S. K., Singha, P. 2021. Current status of non-thermal processing of probiotic foods: A review. *Journal of Food Engineering*, 303. Article number: 110567. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110567>.
- Bjornsdottir-Butler, K., Abraham, A., Harper, A., Dunlap, P. V. et al. 2018. Biogenic amine production by and phylogenetic analysis of 23 *Photobacterium* Species. *Journal of Food Protection*, 81(8), pp. 1264–1274. DOI: <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-18-022>.
- Bozariis, I. S., Parlapani, F. F., Mireles, DeWitt C. A. 2021. High pressure processing at ultra-low temperatures: Inactivation of foodborne bacterial pathogens and quality changes in frozen fish fillets. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 74. Article number: 102811. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102811>.
- Burak, L. Ch. 2024. Modern food processing methods: A critical review. *The Scientific Heritage*, 130(130), pp. 45–59. EDN: MQYNGM. = Бурак Л. Ч. Современные методы обработки пищевых продуктов. Критический обзор // The Scientific Heritage. 2024. № 130(130). С. 45–59. EDN: MQYNGM. (In Russ.)
- Burak, L. Ch., Sapach, A. N. 2024. Improving the technological properties of food grains by using modern technologies: A review of the subject field. *Health, Food & Biotechnology*, 6(1), pp. 40–64. EDN: YPIKVZ. = Бурак Л. Ч., Сапач А. Н. Улучшение технологических свойств продовольственного зерна за счет использования современных технологий: Обзор предметного поля // Health, Food & Biotechnology. 2024. Т. 6, № 1. С. 40–64. EDN: YPIKVZ. (In Russ.)
- Cen, S., Fang, Q., Tong, L., Yang, W. et al. 2021. Effects of chitosan-sodium alginate-nisin preservatives on the quality and spoilage microbiota of *Penaeus vannamei* shrimp during cold storage. *International Journal of Food Microbiology*, 349. Article number: 109227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109227>.
- Chakraborty, P., Nath, D., Hoque, M., Sarkar, P. et al. 2022. Biopolymer-based antimicrobial coatings for aquatic food products: A review. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46. Article number: 16465. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpp.16465>.
- Chen, H., Wang, M., Yang, C., Wan, X. et al. 2019. Bacterial spoilage profiles in the gills of Pacific oysters (*Crassostrea gigas*) and Eastern oysters (*C. virginica*) during refrigerated storage. *Food Microbiology*, 82, pp. 209–217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fm.2019.02.008>.
- Chen, L., Jiao, D., Liu, H., Zhu, C. et al. 2022a. Effects of water distribution and protein degradation on the texture of high pressure-treated shrimp (*Penaeus monodon*) during chilled storage. *Food Control*, 132. Article number: 108555. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108555>.
- Chen, L., Jiao, D., Yu, X., Zhu, C. et al. 2022b. Effect of high pressure processing on the physicochemical and sensorial properties of scallop (*Mizuhopecten yessoensis*) during iced storage. *International Journal of Food Science & Technology*, 57(2), pp. 1226–1236. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.15505>. Special Issue: Emerging Clean-Label Trends in Non-Thermal Technologies and Their Compositional Effects on Food Quality.

- Chen, Y., Miao, W., Li, X., Xu, Y. et al. 2023. The structure, properties, synthesis method and antimicrobial mechanism of ϵ -polylysine with the preservative effects for aquatic products. *Trends in Food Science & Technology*, 139. Article number: 104131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104131>.
- Christopher, C., Ling, C., Stefan, G., Miguel, Á. C. et al. 2020. The future of food from the sea. *Nature*, 588, pp. 95–100. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2616-y>.
- Çiçek, S., Özoğul, F. 2023. Nanotechnology-based preservation approaches for aquatic food products: A review with the current knowledge. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(19), pp. 3255–3278. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2096563>.
- Costello, C., Cao, L., Gelcich, S., Cisneros-Mata, M. Á. et al. 2020. The future of food from the sea. *Nature*, 588, pp. 95–100. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2616-y>.
- de Alba, M., Pérez-Andrés, J. M., Harrison, S. M., Brunton, N. P. et al. 2019. High pressure processing on microbial inactivation, quality parameters and nutritional quality indices of mackerel fillets. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 55, pp. 80–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.05.010>.
- de Angelis De Souza, Silva, da Silva Campelo, M. C., Soares Rebouças, L. de O., Vitoriano, J. de O. et al. 2019. Use of cold atmospheric plasma to preserve the quality of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Journal of Food Protection*, 82(7), pp. 1217–1223. DOI: <https://doi.org/10.4315/0362-028x.jfp-18-369>.
- David, C., Frank, A., Jillian, F., Ly, N. et al. 2023. Aquatic food loss and waste rate in the United States is half of earlier estimates. *Nature Food*, 4, pp. 1058–1069. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43016-023-00881-z>.
- Dong, H., Gai, Y., Fu, S., Zhang, D. 2022. Application of biotechnology in specific spoilage organisms of aquatic products. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.895283>.
- Esua, O. J., Cheng, J.-H., Sun, D.-W. 2021. Optimisation of treatment conditions for reducing *Shewanella putrefaciens* and *Salmonella* Typhimurium on grass carp treated by thermoultrasound-assisted plasma functionalized buffer. *Ultrasonics Sonochemistry*, 76. Article number: 105609. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105609>.
- Esua, O. J., Sun, D.-W., Cheng, J.-H., Li, J.-L. 2022. Evaluation of storage quality of vacuum-packaged silver Pomfret (*Pampus argenteus*) treated with combined ultrasound and plasma functionalized liquids hurdle technology. *Food Chemistry*, 391. Article number: 133237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133237>.
- Fang, J., Feng, L., Lu, H., Zhu, J. 2022. Metabolomics reveals spoilage characteristics and interaction of *Pseudomonas lundensis* and *Brochothrix thermosphacta* in refrigerated beef. *Food Research International*, 156. Article number: 111139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111139>.
- Gadoin, E., Desnues, C., Bouvier, T., D'orbcastel, E. R. et al. 2022. Tracking spoilage bacteria in the tuna microbiome. *FEMS Microbiology Ecology*, 98(10). Article number: 110. DOI: <https://doi.org/10.1093/femsec/fiac110>.
- Gautam, R. K., Venugopal, V. 2021. Electron beam irradiation to control DOI biohazards in seafood. *Food Control*, 130. Article number: 108320. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108320>.
- Giannoglou, M., Dimitrakellis, P., Efthimiadou, A., Gogolides, E. et al. 2021. Comparative study on the effect of cold atmospheric plasma, ozonation, pulsed electromagnetic fields and high-pressure technologies on sea bream fillet quality indices and shelf life. *Food Engineering Reviews*, 13, pp. 175–184. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09248-7>.
- Gómez-Estaca, J., López-Caballero, M. E., Martínez-Bartolomé, M. Á., López de Lacey, A. M. et al. 2018. The effect of the combined use of high pressure treatment and antimicrobial edible film on the quality of salmon carpaccio. *International Journal of Food Microbiology*, 283, pp. 28–36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.06.015>.
- Guo, H., Feng, T., Qi, W., Kong, Q. et al. 2021. Effects of electron-beam irradiation on volatile flavor compounds of salmon fillets by the molecular sensory science technique. *Journal of Food Science*, 86(1), pp. 184–193. DOI: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15541>.
- Guo, L., Roknul, Azam S. M., Guo, Y., Liu, D. et al. 2022. Germicidal efficacy of the pulsed magnetic field against pathogens and spoilage microorganisms in food processing: An overview. *Food Control*, 136. Article number: 108496. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108496>.
- Hauschild, P., Vogel, R. F., Hilgarth, M. 2022. Transcriptomic analysis of the response of *Photobacterium phosphoreum* and *Photobacterium carnosum* to co-contaminants on chicken meat. *Archives of Microbiology*, 204. Article number: 467. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00203-022-03059-6>.
- Huang, J., Zhou, Y., Chen, M., Huang, J. et al. 2021. Evaluation of negative behaviors for single specific spoilage microorganism on little yellow croaker under modified atmosphere packaging: Biochemical properties characterization and spoilage-related volatiles identification. *LWT*, 140. Article number: 110741. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110741>.
- Huang, Q., Jiao, X., Yan, B., Zhang, N. et al. 2022. Changes in physicochemical properties of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi during chilled storage: The roles of spoilage bacteria. *Food Chemistry*, 387. Article number: 132847. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132847>.

- Huina, D., Yuanming, G., Shaoping, F., Dawei, Z. 2022. Application of biotechnology in specific spoilage organisms of aquatic products. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10. Article number: 895283. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.895283>.
- Illikoud, N., Klopp, C., Roulet, A., Bouchez, O. et al. 2018. One complete and three draft genome sequences of four *Brochothrix thermosphacta* strains, CD 337, TAP 175, BSAS1 3 and EBP 3070. *Standards in Genomic Sciences*, 13. Article number: 22. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40793-018-0333-z>.
- Jadhav, H. B., Annapure, U. 2021. Consequences of non-thermal cold plasma treatment on meat and dairy lipids – A review. *Future Foods*, 4. Article number: 100095. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100095>.
- Jia, S., Liu, Y., Zhuang, S., Sun, X. et al. 2019. Effect of ϵ -polylysine and ice storage on microbiota composition and quality of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) stored at 0 °C. *Food Microbiology*, 83, pp. 27–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fm.2019.04.007>.
- Kim, H.-H., Ryu, S.-H., Jeong, S.-M., Kang, W.-S. et al. 2021. Effect of high hydrostatic pressure treatment on urease activity and inhibition of fishy smell in mackerel (*Scomber japonicus*) during storage. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 31(12), pp. 1684–1691. DOI: <https://doi.org/10.4014/jmb.2106.06052>.
- Lee, Y.-C., Hsieh, C.-Y., Chen, M.-L., Wang, C.-Y. et al. 2020. High-pressure inactivation of histamine-forming bacteria *Morganella morganii* and *Photobacterium phosphoreum*. *Journal of Food Protection*, 83(4), pp. 621–627. DOI: <https://doi.org/10.4315/0362-028x.jfp-19-267>.
- Li, F., Zhong, Q., Kong, B., Pan, N. et al. 2022b. Synergistic effect and disinfection mechanism of combined treatment with ultrasound and slightly acidic electrolyzed water and associated preservation of mirror carp (*Cyprinus carpio* L.) during refrigeration storage. *Food Chemistry*, 386. Article number: 132858. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132858>.
- Li, H., Zhao, Q., Liu, W., Liao, T. et al. 2022a. Changes in the microbiota of a vacuum-packed cooked bass product and the effects of cobalt irradiation on its quality during storage. *LWT*, 172. Article number: 114199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114199>.
- Li, H.-L., Yu, Y.-H., Xiong, G.-Q., Liao, T. et al. 2020. Cobalt-60 and electron beam irradiation-induced lipid oxidation in largemouth bass (*Micropterus salmoides*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(12), pp. 4612–4617. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.10521>.
- Li, W., Ma, H., He, R., Ren, X. et al. 2021. Prospects and application of ultrasound and magnetic fields in the fermentation of rare edible fungi. *Ultrasonics Sonochemistry*, 76. Article number: 105613. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105613>.
- Liang, Q., Yunchun, Z., Hui, M., Xiaofei, T. et al. 2022. The quality and bacterial community changes in freshwater crawfish stored at 4 °C in vacuum packaging. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 27. Article number: 8618. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27238618>.
- Liao, X., Su, Y., Liu, D., Chen, S. et al. 2018. Application of atmospheric cold plasma-activated water (PAW) ice for preservation of shrimps (*Metapenaeus ensis*). *Food Control*, 94, pp. 307–314. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.07.026>.
- Lin, C.-S., Tsai, Y.-H., Chen, P.-W., Chen, Y.-C. et al. 2022a. Impacts of high-hydrostatic pressure on the organoleptic, microbial, and chemical qualities and bacterial community of freshwater clam during storage studied using high-throughput sequencing. *LWT*, 171. Article number: 114124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114124>.
- Lin, D., Sun, L.-C., Chen, Y.-L., Liu, G.-M. et al. 2022b. Shrimp spoilage mechanisms and functional films/coatings used to maintain and monitor its quality during storage. *Trends in Food Science & Technology*, 129, pp. 25–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.08.020>.
- Lin, W.-C., He, Y.-M., Shi, C., Mu, C.-K. et al. 2022c. ATP catabolism and bacterial succession in postmortem tissues of mud crab (*Scylla paramamosain*) and their roles in freshness. *Food Research International*, 155. Article number: 110992. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.110992>.
- Lin, X., Liu, C., Cai, L., Yang, J. et al. 2021. Effect of high hydrostatic pressure processing on biochemical characteristics, bacterial counts, and color of the red claw crayfish *Cherax quadricarinatus*. *Journal of Shellfish Research*, 40(1), pp. 177–184. DOI: <https://doi.org/10.2983/035.040.0117>.
- Lina, G., Rohnul, A. S. M., Yiting, G., Dandan, L. et al. 2021. Germicidal efficacy of the pulsed magnetic field against pathogens and spoilage microorganisms in food processing: An overview. *Food Control*, 136. Article number: 108496. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108496>.
- Linhares, M. de F. D., Alves Filho, E. G., Silva, L. M. A., Fonteles, T. V. et al. 2020. Thermal and non-thermal processing effect on açai juice composition. *Food Research International*, 136. Article number: 109506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109506>.
- Liu, C., Gu, Z., Lin, X., Wang, Y. et al. 2022. Effects of high hydrostatic pressure (HHP) and storage temperature on bacterial counts, color change, fatty acids and non-volatile taste active compounds of oysters (*Crassostrea ariakensis*). *Food Chemistry*, 372. Article number: 131247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131247>.

- Liu, X., Zhang, M., Meng, X., Bai, Y. et al. 2021. Effect of plasma-activated water on *Shewanella putrefaciens* population growth and quality of Yellow River Carp (*Cyprinus carpio*) fillets. *Journal of Food Protection*, 84(10), pp. 1722–1728. DOI: <https://doi.org/10.4315/jfp-21-031>.
- Lou, X., Zhai, D., Yang, H. 2021. Changes of metabolite profiles of fish models inoculated with *Shewanella baltica* during spoilage. *Food Control*, 123. Article number: 107697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107697>.
- Love, D. C., Asche, F., Fry, J., Nguyen, L. et al. 2023. Aquatic food loss and waste rate in the United States is half of earlier estimates. *Nature Food*, 4, pp. 1058–1069. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43016-023-00881-z>.
- Lu, N., Ma, J., Sun, D.-W. 2022. Enhancing physical and chemical quality attributes of frozen meat and meat products: Mechanisms, techniques and applications. *Trends in Food Science & Technology*, 124, pp. 63–85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.004>.
- Luo, Q., Hamid, N., Oey, I., Leong, S. Y. et al. 2019. Physicochemical changes in New Zealand abalone (*Haliotis iris*) with pulsed electric field (PEF) processing and heat treatments. *LWT*, 115. Article number: 108438. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108438>.
- Ma, J., Meng, L., Wang, S., Li, J. et al. 2023. Inactivation of *Vibrio parahaemolyticus* and retardation of quality loss in oyster (*Crassostrea gigas*) by ultrasound processing during storage. *Food Research International*, 168. Article number: 112722. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112722>.
- Mehrzadeh, S., Roomiani, L. 2021. Effect of gamma irradiation and modified atmosphere packaging on the shelf-life of white shrimp (*Metapenaeus affinis*). *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 20(4), pp. 1004–1021. DOI: 10.22092/ijfs.2021.350431.0.
- Neokleous, I., Tarapata, J., Papademas, P. 2022. Non-thermal processing technologies for dairy products: Their effect on safety and quality characteristics. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. Article number: 856199. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.856199>.
- Nunes, B. V., da Silva, C. N., Bastos, S. C., de Souza, V. R. 2022. Microbiological inactivation by ultrasound in liquid products. *Food and Bioprocess Technology*, 15, pp. 2185–2209. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02818-z>.
- Odeyemi, O. A., Burke, C. M., Bolch, C. C. J., Stanley, R. 2018. Seafood spoilage microbiota and associated volatile organic compounds at different storage temperatures and packaging conditions. *International Journal of Food Microbiology*, 280, pp. 87–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.12.029>.
- Olatunde, O. O., Benjakul, S. 2018. Non-thermal processes for shelf-life extension of seafoods: A revisit. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(4), pp. 892–904. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12354>.
- Olatunde, O. O., Chantakun, K., Benjakul, S. 2021. Microbial, chemical qualities and shelf-life of blue swimming crab (*Portunus armatus*) lump meat as influenced by in-package high voltage cold plasma treatment. *Food Bioscience*, 43. Article number: 101274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101274>.
- Pan, Y.-j., Xie, Z.-j., Jin, Y.-m., Yang, N. et al. 2023. Effect of alternating magnetic field on quality of grass carp fillets during cold storage. *Food and Fermentation Industries*, 49(5), pp. 207–214.
- Parlapani, F. F., Anagnostopoulos, D. A., Karamani, E., Mallouchos, A. et al. 2023. Growth and volatile organic compound production of *Pseudomonas* fish spoiler strains on fish juice agar model substrate at different temperatures. *Microorganisms*, 11(1). Article number: 189. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms11010189>.
- Peng, S., Wei, H., Zhan, S., Yang, W. et al. 2022. Spoilage mechanism and preservation technologies on the quality of shrimp: An overview. *Trends in Food Science & Technology*, 129, pp. 233–243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.09.024>.
- Qiu, L., Zhao, Y., Ma, H., Tian, X. et al. 2022. The quality and bacterial community changes in freshwater crawfish stored at 4 °C in vacuum packaging. *Molecules*, 27(23). Article number: 8618. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27238618>.
- Rathod, N. B., Nirmal, N. P., Pagarkar, A., Özogul, F. et al. 2022. Antimicrobial impacts of microbial metabolites on the preservation of fish and fishery products: A review with current knowledge. *Microorganisms*, 10(4). Article number: 773. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms10040773>.
- Samirah, A., Reza, T. 2018. Development of a sweet potato starch-based coating and its effect on quality attributes of shrimp during refrigerated storage. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie – Food Science and Technology*, 88, pp. 203–209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.10.022>.
- Semra, Ç., Fatih, Ö. 2023. Nanotechnology-based preservation approaches for aquatic food products: A review with the current knowledge. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63, pp. 3255–3278. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2096563>.
- Shi, G., Zhou, M., Wang, L., Xiao, Z. et al. 2021. The effect of gamma and electron beam irradiation on the structural and physicochemical properties of myofibrillar protein and myosin from grass carp. *Journal of Food Biochemistry*, 45(8). Article number: e13828. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfbc.13828>.

- Shiekh, K. A., Benjakul, S. 2020. Effect of pulsed electric field treatments on melanosis and quality changes of Pacific white shrimp during refrigerated storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(1). Article number: e14292. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpp.14292>.
- Shiekh, K. A., Benjakul, S., Gulzar, S. 2021. Impact of pulsed electric field and vacuum impregnation with Chamuang leaf extract on quality changes in Pacific white shrimp packaged under modified atmosphere. *LWT*, 149. Article number: 111899. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111899>.
- Singh, A., Benjakul, S. 2020. The combined effect of squid pen chitoooligosaccharides and high voltage cold atmospheric plasma on the shelf-life extension of Asian sea bass slices stored at 4 °C. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 64. Article number: 102339. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102339>.
- Situ, H., Li, Y., Gao, J., Zhang, C. et al. 2023. Effects of cold atmospheric plasma on endogenous enzyme activity and muscle protein oxidation in *Trachinotus ovatus*. *Food Chemistry*, 407. Article number: 135119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135119>.
- Suemitsu, L., Cristianini, M. 2019. Effects of high pressure processing (HPP) on quality attributes of tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets during refrigerated storage. *LWT*, 101, pp. 92–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.11.028>.
- Sun, Y., Xu, Y., Gao, P., Xia, W. 2021. Improvement of the quality stability of vacuum-packaged fermented fish (*Suanyu*) stored at room temperature by irradiation and thermal treatments. *International Journal of Food Science & Technology*, 56(1), pp. 224–232. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.14622>.
- Tocher, D., Betancor, M., Sprague, M., Olsen, R. et al. 2019. Omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acids, EPA and DHA: Bridging the gap between supply and demand. *Nutrients*, 11(1). Article number: 89. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu11010089>.
- Tsai, Y.-H., Kung, H.-F., Lin, C.-S., Hsieh, C.-Y. et al. 2022. Impacts of high-pressure processing on quality and shelf-life of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) stored at 4 °C and 15 °C. *International Journal of Food Properties*, 25(1), pp. 237–251. DOI: <https://doi.org/10.1080/10942912.2022.2029483>.
- Tsironi, T., Anjos, L., Pinto, P. I. S., Dimopoulos, G. et al. 2019. High pressure processing of European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) fillets and tools for flesh quality and shelf life monitoring. *Journal of Food Engineering*, 262, pp. 83–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.05.010>.
- Wang, J., Fu, T., Wang, Y., Zhang, J. 2022. Effects of high-voltage atmospheric cold plasma treatment on microbiological and quality characters of tilapia fillets. *Foods*, 11(16). Article number: 2398. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11162398>.
- Wei, Q., Mei, J., Xie, J. 2022. Application of electron beam irradiation as a non-thermal technology in seafood preservation. *LWT*, 169. Article number: 113994. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113994>.
- Wen, L., Haile, M., Ronghai, H., Xiaofeng, R. et al. 2021. Prospects and application of ultrasound and magnetic fields in the fermentation of rare edible fungi. *Ultrasonics Sonochemistry*, 76. Article number: 105613. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105613>.
- Xu, D., Zhang, H., Zhang, L., Huang, T. et al. 2021. Effects of electron beam irradiation on quality of weever fillets during refrigerated storage. *Food Frontiers*, 2(4), pp. 519–526. DOI: <https://doi.org/10.1002/fft2.80>.
- Xu, Y., Yin, Y., Zhao, H., Li, Q. et al. 2020. Effects of cinnamaldehyde combined with ultrahigh pressure treatment on the flavor of refrigerated *Paralichthys olivaceus* fillets. *RSC Advances*, 10(21), pp. 12573–12581. DOI: <https://doi.org/10.1039/d0ra01020k>.
- Yan, C., Wenhua, M., Xiangxin, L., Yan, X. et al. 2023. The structure, properties, synthesis method and antimicrobial mechanism of ϵ -polylysine with the preservative effects for aquatic products. *Trends in Food Science & Technology*, 139. Article number: 104131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104131>.
- Yu, P., Yan, C., Yang, F., Xu, Y. et al. 2018. Effect of high pressure processing on the quality and endogenous enzyme activities of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fillets stored at 4 °C. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 27(10), pp. 1093–1105. DOI: <https://doi.org/10.1080/10498850.2018.1534916>.
- Yu, Q., Pan, H., Qian, C., Shao, H. et al. 2022a. Determination of the optimal electron beam irradiation dose for treating shrimp (*Solenocera melanthero*) by means of physical and chemical properties and bacterial communities. *LWT*, 153(10). Article number: 112539. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112539>.
- Yu, Q., Pan, H., Shao, H., Qian, C. et al. 2022b. UPLC/MS-based untargeted metabolomics reveals the changes in muscle metabolism of electron beam irradiated *Solenocera melanthero* during refrigerated storage. *Food Chemistry*, 367. Article number: 130713. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130713>.
- Zeng, X., Jiao, D., Yu, X., Chen, L. et al. 2022. Effect of ultra-high pressure on the relationship between endogenous proteases and protein degradation of Yesso scallop (*Mizuhopecten yessoensis*) adductor muscle during iced storage. *Food Chemistry: X*, 15. Article number: 100438. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100438>.
- Zhang, B., Pérez-Won, M., Tabilo-Munizaga, G., Aubourg, S. P. et al. 2021. Inhibition of lipid damage in refrigerated salmon (*Oncorhynchus kisutch*) by a combined treatment of CO₂ packaging and high-pressure processing. *International Journal of Food Science & Technology*, 56(11): New Alternative Proteins for Sustainable Nutrition and Healthy Diet, pp. 5433–6112. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.15179>.

- Zhang, W., Yu, Y., He, H., Lou, X. et al. 2022. The adhesion and spoilage of *Shewanella putrefaciens* in tilapia. *Foods*, 11(131). Article number: 1913. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11131913>.
- Zhao, L., Zhao, X., Wu, J., Lou, X. et al. 2019. Comparison of metabolic response between the planktonic and air-dried *Escherichia coli* to electrolysed water combined with ultrasound by ¹H NMR spectroscopy. *Food Research International*, 125. Article number: 108607. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108607>.
- Zhou, J., Dong, X., Kong, B., Sun, Q. et al. 2023. Effects of magnetic field-assisted immersion freezing at different magnetic field intensities on the muscle quality of golden pompano (*Trachinotus ovatus*). *Food Chemistry*, 407. Article number: 135092. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135092>.
- Zhu, C., Chen, L., Zeng, X., Sun, Y. et al. 2022. Effects of ultrahigh pressure-magnetic field treatment on protein properties and quality characteristics of stored shrimp (*Litopenaeus Vannamei*). *LWT*, 170. Article number: 114070. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114070>.
- Zhuang, S., Hong, H., Zhang, L., Luo, Y. 2021. Spoilage-related microbiota in fish and crustaceans during storage: Research progress and future trends. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(1), pp. 252–288. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12659>.
- Zhuang, S., Tan, Y., Hong, H., Li, D. et al. 2022. Exploration of the roles of spoilage bacteria in degrading grass carp proteins during chilled storage: A combined metagenomic and metabolomic approach. *Food Research International*, 152. Article number: 110926. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110926>.
- Zouelm, F., Abhari, K., Hosseini, H., Khani, M. 2019. The effects of cold plasma application on quality and chemical spoilage of pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during refrigerated storage. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 28(6), pp. 624–636. DOI: <https://doi.org/10.1080/10498850.2019.1627452>.

Сведения об авторе

Бурак Леонид Чеславович – ул. Пономаренко, 35А, г. Минск, Республика Беларусь, 220015; Общество с ограниченной ответственностью "БЕЛПРОСАКВА", д-р философии в области пищевых наук (PhD), канд. техн. наук, директор; e-mail: leonidburak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6613-439X>

Leonid Ch. Burak – 35A Ponomarenko Str., Minsk, Republic of Belarus, 220015; Limited Liability Company BELROSAKVA, PhD, Cand. Sci. (Engineering), Director; e-mail: leonidburak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6613-439X>