

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-1-99-105>

Поступила 02.10.2024

Поступила после рецензирования 17.03.2025

Принята в печать 21.03.2025

© Пивненко Т. Н., Позднякова Ю. М., Есипенко Р. В., 2025



<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Open access

ВЛИЯНИЕ ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ ФУКУСОВЫХ ВОДОРОСЛЕЙ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И ОКИСЛЕНИЕ ЛИПИДОВ В МЫШЕЧНОЙ ТКАНИ РЫБ

Пивненко Т. Н.*, Позднякова Ю. М., Есипенко Р. В.

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный Университет (Дальрыбвтуз), Владивосток, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

фукоидан,
полифенолы,
антиоксидантная
активность,
структуро-
образование,
окисление липидов

Увеличение пищевой ценности и улучшение технологических показателей полуфабрикатов и готовых рыбных продуктов соответствуют современным тенденциям здорового питания и обеспечивают рациональное использование сырья. Лабильная структура компонентов рыбного сырья и особенно его липидных составляющих способствует негативным изменениям, связанным с окислительными процессами при переработке и хранении. Пищевые волокна с доказанной антиоксидантной активностью способны ингибировать перекисное окисление липидов в биологических системах и пищевом сырье, одновременно оказывая стабилизирующее действие на реологические свойства продукции. Целью работы являлось исследование влияния продуктов переработки бурой водоросли рода фукусов *Fucus evanescens* (а именно гелей с сульфатированным фукоиданом и экстракта водорастворимых полифенолов) на окислительную стабильность липидов и структурообразование в мышечной ткани рыб на примере фарша горбуши. Обработка гелей фукоидана ультразвуком позволила получить продукт с высокой антиоксидантной активностью (АОА) и повышенной вязкостью. АОА гелей и экстрактов составляла 45 и 91% на 1 мг сухого вещества соответственно. Внесение гелей в состав фаршевых смесей из мышечной ткани горбуши обеспечило снижение их вязкоупругих характеристик (прочности, адгезивности и упругости), что оказало положительное влияние на консистенцию полуфабрикатов и готовых изделий. Внесение сухих экстрактов полифенолов в фарш горбуши привело к утрате способности его к формообразованию, связанной со снижением водоудерживающей способности белков. Потери при термообработке для фаршей с добавлением геля были вдвое меньшими, чем для контрольных образцов, и оставались стабильными при морозильном хранении. Исследование динамики накопления первичных вторичных продуктов окисления липидов, оснований Шиффа и малонового диальдегида в процессе морозильного хранения показало, что начальные окислительные изменения в фарше горбуши затрагивают фосфолипиды, затем распространяются на триглицериды. Через 5 месяцев морозильного хранения наблюдалось накопление малонового диальдегида до значений 1,27 и 1,60 мг/кг фарша для контрольных образцов и образцов с добавлением экстракта. При добавлении гелей фукоидана к концу указанного срока хранения содержание малонового диальдегида составило 0,16 мг/кг фарша. Полученные результаты позволяют рекомендовать гели фукоидана с повышенной АОА для стабилизации структуры мышечной ткани рыб и антиоксидантной защиты ее компонентов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: статья подготовлена в рамках выполнения исследований по государственному заданию Федерального агентства по рыболовству РФ № 827/2023.

Received 02.10.2024

Accepted in revised 17.03.2025

Accepted for publication 21.03.2025

© Pivnenko T. N., Pozdnyakova Yu. M., Esipenko R. V., 2025

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

EFFECT OF PRODUCTS OF FUCUS ALGA PROCESSING ON STRUCTURE FORMATION AND OXIDATION OF LIPIDS IN FISH MUSCLE TISSUE

Tatiana N. Pivnenko*, Yuliya M. Pozdnyakova, Roman V. Esipenko

Far Eastern State Technical Fisheries University (Dalrybvtuz), Vladivostok, Russia

KEY WORDS:

fucoidan, polyphenols,
antioxidant activity,
structure formation,
oxidation of lipids

ABSTRACT

An increase in the nutritional value and improvement of technological parameters of semi-finished products and final fish products correspond to the modern trends of healthy nutrition and ensure the rational use of raw materials. The labile structure of components of fish raw materials and especially their lipid constituents facilitates negative changes linked to oxidative processes during processing and storage. Dietary fiber with proven antioxidant activity can inhibit peroxidation of lipids in biological systems and food raw materials exerting at the same time the stabilizing effect on rheological properties of products. The aim of the work was to study an effect of products of processing of brown alga *Fucus evanescens* (namely gels with sulfated fucoidan and the extract of water-soluble polyphenols) on the oxidative stability of lipids and structure formation in fish muscle tissue by the example of humpback salmon minced meat. Processing of fucoidan gels with ultrasound allowed obtaining a product with the high antioxidant activity (AOA) and increased viscosity. The AOA of gels and extracts was 45 and 91% per 1 mg of dry matter, respectively. Introduction of gels into the composition of minced meat mixtures from muscle tissue of humpback salmon ensured a decrease in their viscoelastic characteristics (strength, adhesiveness and elasticity), which exerted a positive effect on the consistency of semi-finished products and final products. Addition of dry extracts of polyphenols into humpback salmon minced meat led to the loss of its shaping ability linked to a decrease in the water holding capacity of proteins. Cooking losses in minced meat with addition of gel were two times lower than those in the control samples and remained stable during frozen storage. The study of the dynamics of accumulation of primary and secondary products of lipid oxidation, Schiff bases and malondialdehyde during frozen storage showed that the initial oxidative changes in the humpback salmon minced meat affected phospholipids, and then they were spread to triglycerides. After five months of frozen storage,

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Пивненко, Т. Н., Позднякова, Ю. М., Есипенко, Р. В. (2025). Влияние продуктов переработки фукусковых водорослей на структурообразование и окисление липидов в мышечной ткани рыб. *Пищевые системы*, 8(1), 99–105. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-1-99-105>

FOR CITATION: Pivnenko, T. N., Pozdnyakova, Yu. M., Esipenko, R. V. (2025). Effect of products of Fucus alga processing on structure formation and oxidation of lipids in fish muscle tissue. *Food Systems*, 8(1), 99–105. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-1-99-105>

accumulation of malondialdehyde up to the values of 1.27 and 1.60 mg/kg minced meat was observed in the control samples and the samples with the addition of the extract. When adding fucoidan gels, the content of malondialdehyde was 0.16 mg/kg minced meat by the end of the indicated storage period. The results obtained make it possible to recommend fucoidan gels with increased AOA to stabilize the structure of fish muscle tissue and antioxidant protection of its components.

FUNDING: The paper was prepared within the framework of the research on the State assignment of the Federal Agency for Fishery of the RF No. 827/2023.

1. Введение

В настоящее время использование пищевых волокон (ПВ) в технологии переработки мясных и рыбных продуктов показывает обоснованные преимущества для увеличения пищевой ценности и улучшения технологических показателей полуфабрикатов и готовых изделий. Это, в свою очередь, соответствует современным тенденциям здорового питания и обеспечивает рациональное использование сырья [1].

Рыба и морепродукты содержат легкоусвояемые белки и незаменимые липиды, которые одновременно имеют весьма лабильную структуру и подвержены негативному влиянию факторов внешней среды. Высокая ненасыщенность липидов в морском сырье, наличие сильных проокислительных систем способствуют быстрому окислению липидов при переработке и хранении рыбных продуктов. Реакция окисления липидов влияет на стабильность белков, питательные свойства и вкусовые качества рыбы и может рассматриваться как основная химическая реакция, ставящая под угрозу рациональное использование пищевых ресурсов [2,3].

В этом контексте особый интерес представляют ПВ, обладающие антиоксидантной активностью (АОА). Основные источники их получения — отходы промышленной переработки фруктов и овощей, а также морские водоросли [4,5]. Добавление ПВ-антиоксидантов в рыбные продукты может обеспечить структурообразование, обогащение рациона полезными компонентами, торможение процессов окисления полиненасыщенных жирных кислот, которые рассматриваются в качестве предпочтительных ингредиентов пищевого рациона. При этом существует возможность разработки новых видов рыбных изделий, обогащенных ПВ, хорошо адаптированных к предпочтениям потребителей.

Недавно была введена концепция пищевых волокон с антиоксидантными свойствами (АПВ) [4,5]. Основной характеристикой этих натуральных продуктов должно быть сочетание физиологических эффектов ПВ и антиоксидантов в одном материале. Согласно выдвинутой концепции, 1 г АПВ должен иметь способность к поглощению свободных радикалов (по реакции с DPPH (2,2-дифенил-1-пикрилгидразилом)), эквивалентную 50 мг витамина Е, а содержание ПВ в препарате должно превышать 50% по сухой массе и происходить из природных материалов.

Привлекательность применения природных антиоксидантов в качестве стабилизаторов пищевых продуктов возрастает из-за их потенциальной пользы для здоровья. Доказано, что перекисное окисление липидов *in vivo* и продукты окисления липидов, поступающие с пищей, являются основной причиной многих заболеваний, в том числе атеросклероза, рака, процессов старения [6,7]. Эндегенные растительные антиоксиданты способны ингибировать перекисное окисление липидов и обеспечивать защиту от окислительного повреждения биологических систем и пищевого сырья.

Среди ПВ, обладающих АОА, одними из наиболее эффективных считаются сульфатированные полисахариды (СП), такие как фукоиданы. Они представляют собой сложно устроенную иерархию СП, широко распространенных в клеточных стенках бурых морских водорослей [8–10]. Фукусковые водоросли в целом отличаются высоким содержанием антиоксидантных компонентов, кроме фукоиданов выделены полифенольные соединения — флоротанины, а также каротиноид фукоксантины [8,10,11]. В настоящее время дискуссионным остается вопрос о том, кому принадлежит приоритет в АОА — фукоиданам или связанным с ними полифенольным соединениям [8].

В ряде научных работ обоснованы способы получения и применения фукоидана для обогащения пищевых продуктов в составе измельченных водорослей или в виде очищенного препарата [10,12]. Для усиления биологической активности фукоидана используют различные приемы. Большой интерес вызывает использование ультразвука (УЗ) — сонификации. Сонификация влияет на степень полимеризации, на разрушение комплексов фукоидана с сопутствующими компонентами, а также на дисперсный состав и гелеобразующие свойства. УЗ-обработку используют для выделения фукоидана чаще всего при обработке непосредственно самих водорослей или же для деструкции уже очищенного СП [13–15].

Исследования, проведенные в мясной индустрии, показали, что введение СП в мышечные системы повышает потенциал использования сырья и продуктов, предотвращая окисление липидов [16]. При этом сведения, относящиеся к использованию фукоидана и его производных в рыбопродуктах в качестве структурообразователей и антиоксидантов, ограничены.

Целью данной работы являлось исследование синергетического воздействия экстрактов и гелей из фукусковых водорослей с различными уровнями антиоксидантной активности на окислительную деструкцию липидов и структурообразование в мышечной ткани рыб.

2. Объекты и методы

Объектами исследования выступали мелкодисперсный порошок бурой водоросли *Fucus evanescens* («ФармОушен Лаб», Партизанск, Россия); горбуша дальневосточная мороженая неразделанная *Oncorhynchus gorbuscha* («НЕВИС АРГО», Владивосток); фарш из филе горбуши, полученного после удаления внутренностей, кожи и костей (измельчение филе проводили бытовой электромясорубке).

Для обработки порошка фукуса использовали метод [17], модифицированный нами путем применения ультразвука (УЗ). Для этого сухой мелкодисперсный порошок фукуса промывали в дистиллированной воде для удаления избытка минеральных солей в течение 10 мин. Затем вновь добавляли дистиллированную воду в соотношении 1:10 (порошок: вода), экстрагировали водорастворимые компоненты в течение 4 часов при температуре 30–40 °С. Осадок отделяли фильтрованием, а экстракт высушивали путем сублимации (сублимационная сушилка FD-4 Xi'an Toption Instrument Co., Ltd, Китай). К осадку добавляли раствор 2% HCl в соотношении 1:10 (порошок: кислота) при температуре 30 °С, оставляли на 2 часа при периодическом перемешивании. Далее осадок промывали водой до pH 5,5–6 и добавляли 10% раствор Na₂CO₃ с pH 8,5±0,5 при соотношении порошок: раствор — 1:1. Затем смесь нагревали в течение 2 часов при температуре 40 °С. Полученный продукт представлял собой густой гель коричневого цвета.

Для обработки геля УЗ при обоснованных ранее параметрах [18] использовали ультразвуковой процессор Sonic Vibra Cell модели VCX 130 производства Sonics and Materials, Inc., США. Во избежание перегрева применяли охлаждающую рубашку для поддержания температуры не более 50 °С.

Вязкость (МПа·с) определяли с помощью ротационного вискозиметра серии NDJ (Laboao, Китай) с использованием ротора № 3 при скорости вращения 60 об/мин.

Для выявления реологических показателей (прочность, адгезивность и упругость) использовали текстурометр Брукфильда TexturePro CT3 (Ametek, США), зонд для определения TA18. Скорость погружения — 0,5 мм/с, глубина погружения в поверхность продукта — 5 мм.

Определение содержания фукозы проводили спектрофотометрическим методом по цветной реакции с L-цистеином и серной кислотой (спектрофотометр UV 1800, Shimadzu, Япония). Оптическую плотность полученных растворов измеряли при 393 нм и 430 нм. Для расчета количества фукоидана полученное значение умножали на 2, учитывая условное содержание фукозы в фукоидане, равное 50% [19].

Антиоксидантную активность в образцах измеряли по поглощению свободных радикалов с использованием 1,1-дифенил-2-пикрилгидразила (ДФПГ) по модифицированному методу Qwele [20]. Степень обесцвечивания растворов ДФПГ при добавлении образцов определяли спектрофотометрически при 517 нм. В качестве положительного контроля использовали витамин Е (α-токоферола ацетат). Активность удаления свободных радикалов (ингибирования) ДФПГ, выраженную в процентах, рассчитывали по формуле:

$$\text{Степень ингибирования ДФПГ} = [(A_0 - (A - A_K)/A_0) \times 100], \%, \quad (1)$$

где A_0 — оптическая плотность раствора ДФПГ без образца;

A — оптическая плотность образца с ДФПГ;

A_K — оптическая плотность образца без ДФПГ.

Определение первичных (ППО), вторичных (ВПО) продуктов перекисного окисления липидов и оснований Шиффа (ОШ) проводили

экстракционно-спектрофотометрическим методом [21] (спектрофотометр UV 1800, Shimadzu, Япония). Для этого образцы фаршей гомогенизировали с помощью погружного блендера HM-1000 (ECSI, Китай) при температуре + 4 °C с 0,9% раствором NaCl (в соотношении 1:10), содержащим 3 мМ ЭДТА. К 0,5 г гомогената добавляли 5 мл гептан-изопропаноловой смеси (1:1), встряхивали в течение 10–15 мин, центрифугировали в течение 10 мин при 1500 об/мин для освобождения от белкового осадка. Надосадочную жидкость разбавляли 5 мл гептан-изопропаноловой смеси (3:7) и смешивали с 2 мл раствора HCl (pH = 2,0). Через 30 мин декантировали верхнюю (гептановую) фазу, содержащую триглицериды (ТГ). К нижней (водно-спиртовой) фазе, содержащей фосфолипиды (ФЛ), добавляли 1 г сухого NaCl. Выдерживали 30 мин и декантировали изопропанольную фазу. Измеряли оптическую плотность обеих фаз при длинах волн 220, 232, 278 и 400 нм (спектрофотометр UV 1800, Shimadzu, Япония) против контроля, полученного по схеме приведенной экстракции, но без фарша.

Результаты выражали в единицах индексов окисления (ед.ИО):

- E_{232}/E_{220} — относительное содержание диеновых конъюгатов;
- E_{278}/E_{220} — относительное содержание и сопряженных триенов;
- E_{400}/E_{220} — относительное содержание оснований Шиффа.

Содержание малонового диальдегида (МДА) определяли по реакции с тиобарбитуровой кислотой (ТБК) спектрофотометрическим методом (спектрофотометр UV 1800, Shimadzu, Япония), как описано в работе [22]. Для этого 0,2 г образца смешивали с 1 мл бутанола в мерной колбе объемом 25 мл. 5,0 мл смеси помещали в пробирку и добавляли 5 мл 0,2% раствора ТБК в бутаноле. Пробирку закрывали, встряхивали и нагревали на водяной бане (UT-4308E, ULAB, Китай) при 95 °C в течение 2 часов, охлаждали в проточной воде, центрифугировали на центрифуге Supra 22K (Hanil Science Industrial, Южная Корея) при 6000 об/мин в течение 20 мин. Оптическую плотность супернатанта измеряли при длине волны 535 нм (спектрофотометр UV 1800, Shimadzu, Япония) против контрольной пробы. Величины содержания продуктов взаимодействия с ТБК выражали в мг МДА/кг образца.

Для приготовления опытных образцов фарш горбуши разделили на три части (по 300 г в каждой). Первая часть служила контролем без внесения дополнительных компонентов. Из второй части отбирали по 3 образца (100 г), к которым добавляли 5, 10 и 20% геля, содержащего фукоидан. Из третьей части отбирали по 3 образца (100 г), к которым добавляли 0,05%; 0,15%; 0,25% сублимированного водного экстракта к массе фарша. Фаршевые системы выдерживали 2 ч при комнатной температуре. После исследования свойств сырых фаршей проводили их термообработку на пару при 98 ± 2 °C в течение 15 мин.

Органолептическую оценку образцов осуществляла группа экспертов из 5–7 специалистов, имеющих высшее образование в области технологии рыбных продуктов, в соответствии с ГОСТ ISO 8586–20151. Эксперты оценивали следующие показатели: внешний вид, цвет, вкус, запах, консистенция.

Потери при тепловой обработке определяли путем расчета соотношения массы готового продукта по отношению к массе исходного сырья и выражали в процентах.

Для статистического анализа использовали прикладной пакет Statistica 6. Выборочные параметры, приводимые в таблицах: средняя арифметическая (M), стандартное отклонение (σ), объем анализируемой подгруппы (n). Уровень доверительной вероятности 95%.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Состав и свойства продуктов переработки фукуса

Для исследования влияния продуктов переработки фукусовых водорослей на структурообразование и окисление липидов в мышечной ткани рыб были использованы гель, обогащенный фукоиданом, и сублимированный экстракт водорастворимых компонентов. Рациональные параметры сонификации, которые позволяют регулировать и АОА, и реологические свойства гелей, представлены в работе [18]. В Таблице 1 приведены данные о свойствах, полученных из мелкодисперсного порошка фукуса и препаратов, использованных в работе.

При разработке способа получения гелей были использованы варианты сониирования с варьированием уровня мощности УЗ от 65 до 130 Вт в интервалах времени от 5 до 30 мин при частоте 20 кГц. Рациональными были признаны следующие параметры: 20 кГц, 130 Вт, 20 мин. Такая обработка гелей привела к увеличению содержания фукоидана, к росту АОА и к значительным изменениям дисперсион-

Таблица 1. Свойства препаратов, полученных из порошка фукуса *F. Evanescons*

Table 1. Properties of preparations obtained from the powder of *F. evanescons*

Показатель	Продукт	Значение
Содержание фукоидана, % от исходной массы	Исходный порошок	8,4 ± 1,1
	Гель после УЗ обработки	20,4 ± 1,7
	Экстракт полифенолов сухой	2,1 ± 0,3
АОА, % на 1 мг сухих веществ	Исходный порошок	45,0 ± 0,4
	Гель после УЗ-обработки	64,7 ± 2,1
	Экстракт полифенолов сухой	91,4 ± 0,8
Динамическая вязкость, Мпа · с	Исходный порошок	—
	Гель после УЗ-обработки	1804,2 ± 17,8
	Экстракт полифенолов сухой	—
Прочность, г	Исходный порошок	—
	Гель после УЗ-обработки	16,50 ± 0,81
	Экстракт полифенолов сухой	—

Примечание: АОА% α -токоферола (эталоны сравнения) составила $80,0 \pm 0,5\%$ на 1 мг.; $n = 4$, $p < 0,05$.

ного состава гелей и реологических показателей. При этом происходило образование однородных гелей, которые оставались стабильными при хранении, а также нарастание их прочности и вязкости.

Есть обоснованное мнение, что при сониировании полисахаридов и их комплексов имеет место разрыв водородных связей, преобразование структуры и гидратация макромолекул, в результате чего образуются вязкие кластеры [23].

Приведенные результаты показывают, что полученные гели соответствуют требованиям концепции природных пищевых волокон с антиоксидантными свойствами. В их состав входит от 16 до 20% фукоидана от исходной массы. С учетом количества альгиновых соединений [4,5] общее количество ПВ составит не менее 50%, а величина АОА хорошо соотносится с таковой для α -токоферола.

Полученный на стадии экстракции комплекс полифенольных соединений (флоротаннинов) привлек наше внимание высокими значениями АОА. Поэтому было решено добавлять к рыбным фаршам кроме гелей этот препарат для изучения влияния на окислительные процессы липидов и на реологические свойства полуфабрикатов, а также готовых продуктов.

3.2. Влияние гелей и экстрактов фукуса на структурообразование в мышечной ткани рыб

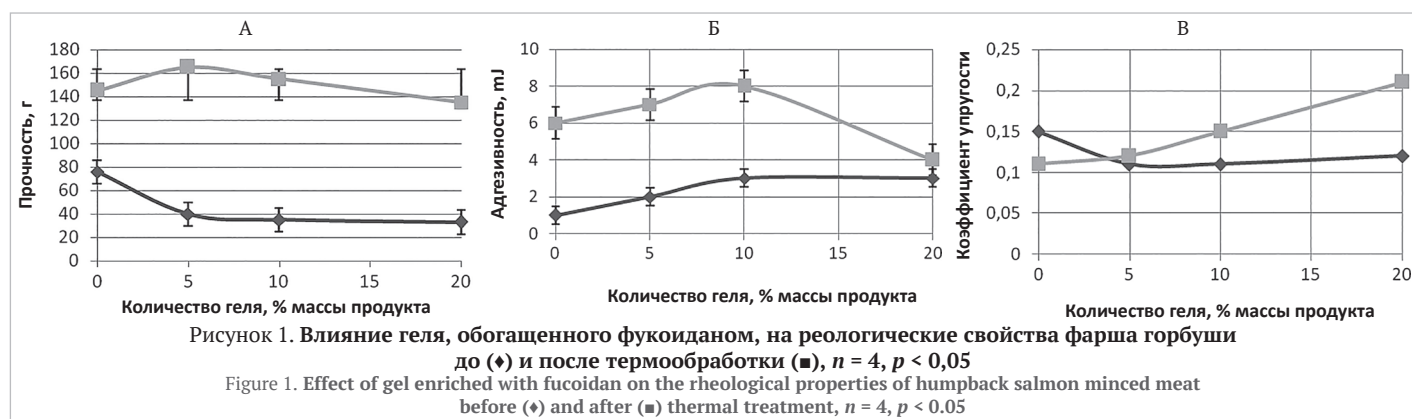
3.2.1. Влияние гелей

Сенсорная оценка образцов показала, что при добавлении гелей наблюдалось некоторое снижение интенсивности цвета фарша, тем не менее он оставался свойственным цвету мышечной ткани рыб лососевых пород. Также увеличение количества вносимых гелей вызывало размягчение фарша, однако при этом он лучше удерживал придаваемую ему форму. После термообработки на пару различия в качестве образцов заметно усилились. При этом цвет, вкус и запах были выражены практически одинаково. Но в присутствии 5% геля формировалась жесткая, резиноподобная текстура, дальнейшее увеличение количества геля до 10% придавало готовому продукту сочную, мягкую консистенцию, но уже при 20% он не удерживал форму, появлялись трещины.

Оценка органолептических показателей сырых и термообработанных изделий соответствовала инструментальным измерениям их реологических параметров (Рисунок 1).

Прочность сырых фаршей снижалась примерно в два раза. У термообработанных фаршей после некоторого роста прочность также уменьшалась. Этот эффект можно считать позитивным, так как он обеспечил более сочную и нежную консистенцию продукта (Рисунок 1А). Среди других показателей можно выделить адгезивность (Рисунок 1Б) и упругость (Рисунок 1В). При этом адгезивность и сырых, и термообработанных на пару образцов повышалась при увеличении концентрации геля до 10%, а затем резко снижалась для первых, но оставалась исходном уровне для вторых. Коэффициент упругости характеризует свойства продукта по восстановлению после деформации, при этом значение, равное 1, указывает на полностью эластичный материал, а значение 0 соответствует полностью вязкому материалу. Полученные сырые и отваренные продукты можно характеризовать как вязкие, но если у первых имело место увеличение вязкости, то у вторых — ее снижение. Наиболее вероятно эти изменения связаны с гелеобразованием в системе белки-полисахариды и с его изменениями после термообработки.

¹ ГОСТ ISO 8586–2015 «Общее руководство по составлению органолептического профиля». М.: Стандартиформ, 2015. — 29 с.



В пищевых системах, содержащих белки и липиды, фукоидан способен выступать в роли эмульгатора. Стабилизация эмульсий позволяет снизить потери при приготовлении или изменении кислотности среды, при этом снижается прочность, но усиливается адгезивность фаршей. Ранее было показано, что такие гидроколлоиды, как альгинаты и каррагинаны, образуют пространственную структурную сетку, параллельную белковой сети миофибриллярных белков. Эта сетка обладает эластичностью, способностью изгибаться и сворачиваться, оказывая меньшее сопротивление внешнему воздействию [24]. Также стабильность комплексов гидроколлоидов с другими биополимерами, главным образом белками, зависит от электростатического связывания отрицательных зарядов молекул фукоидана и поверхностных зарядов белков [10,25,26]. Сравнение полученных результатов и литературных данных позволяет предположить, что фукоидан при взаимодействии с компонентами мышечной ткани также способен образовывать собственную пространственную структуру.

3.2.2. Влияние экстрактов

Высокие значения АОА сухого экстракта определили возможность использования его в низких концентрациях (0,05%; 0,15%; 0,25% от массы). Однако даже такие низкие концентрации вызвали значительные изменения в текстуре образцов фарша с его добавлением. По органолептическим показателям все опытные образцы имели оттенки цвета, характерного для мяса лососевых рыб. Увеличение концентрации экстракта не вызвало различий в сенсорных характеристиках образцов. Главным их отличием от контрольных образцов было то, что они почти полностью теряли способность к формообразованию, что связано с резким снижением водоудерживающей способности белков.

При добавлении в сырой фарш экстракта фукуса наблюдали снижение прочности и уменьшение упругости при повышении адгезивности (Рисунок 2). Увеличение количества добавки, внесенной в исследуемые образцы, не повлияло на изменение реологических показателей. Внесение сухого экстракта обеспечило снижение прочности (Рисунок 2А) готовых изделий почти в 5 раз при заметном увеличении адгезивности (Рисунок 2Б) и упругости (Рисунок 2В). По сравнению с контролем образцы были более мягкими и однородными.

3.3. Влияние гелей и экстрактов фукуса на свойства рыбного фарша при хранении

Образцы сырых фаршей с добавлением 10% геля фукоидана и 0,05% сухого экстракта были заложены на морозильное хранение при температуре -18°C .

Изменения органолептических свойств, сопутствовавшие морозильному хранению в течение 5 месяцев, выразились в постепенном изменении цвета фарша от розового до оранжевого, а запах приоб-

ретал слабо выраженные оттенки окисления для контроля и образцов с гелем. Образцы с добавлением экстракта к пятому месяцу приобрели серовато-оранжевый цвет, а запах имел явно выраженную прогорклость. После термообработки хранившихся образцов наиболее привлекательным вкусом (сочным, мягким и ароматным) обладали изделия с добавлением геля, контрольные образцы были суховатыми с менее выраженным вкусом. Образцы с добавлением экстракта признаны неудовлетворительными.

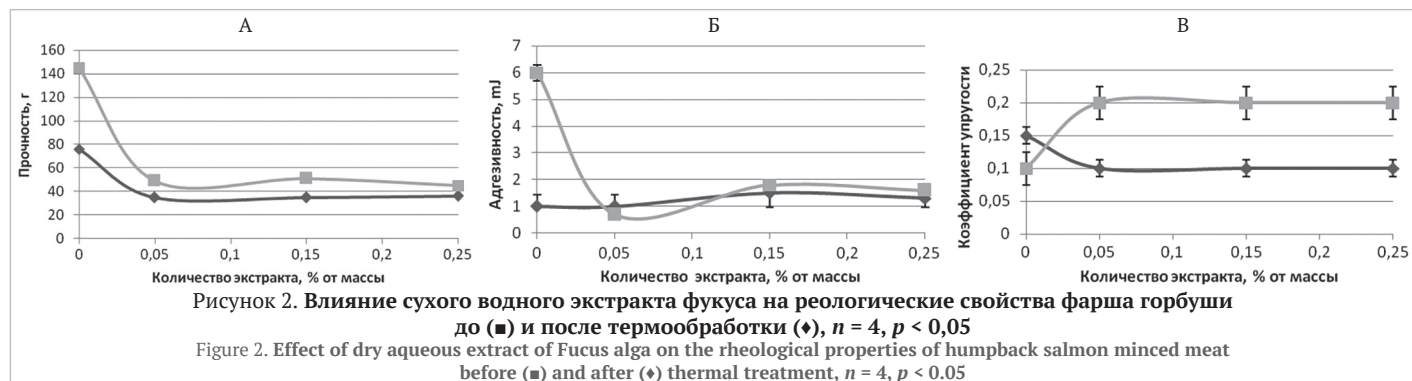
Потери при тепловой обработке для контрольных образцов выросли за период хранения от 15,2 до 24% массы, при добавлении геля — от 9,4 до 13% и при добавлении экстракта — от 12,1 до 22,0%. Эти данные указывают на высокую способность фукоидана удерживать влагу в фарше рыб, сохраняющуюся при морозильном хранении и при термообработке.

Прочность образцов возрастала во всех случаях по мере увеличения срока хранения. Наибольшее увеличение этого показателя выявлено для контрольного образца, а наименьшее — для образцов с добавлением геля. После варки этот показатель имел обратную тенденцию для образцов с добавлением геля и для контрольных, снижаясь более чем в 2 раза в обоих случаях. Для образцов с добавлением экстракта прочность повысилась почти в 2 раза уже через 1 месяц хранения и осталась на прежнем уровне в дальнейшем.

3.3.1. Влияние гелей и экстрактов фукуса на окисление липидов в мышечной ткани рыб

Сложность процесса окисления липидов связана с большим разнообразием образующихся молекул, а также с различными факторами, которые на это влияют. Спектрофотометрический анализ позволяет определить в одной пробе биологического материала различные продукты перекисного окисления липидов: ППО — диеновые конъюгаты (гидроперекиси липидов), ВПО — кетодиены и сопряженные триены (альдегиды, кетоны, спирты, эпоксиды), и конечные — основания Шиффа. Последние образуются в результате обратимой реакции между карбонильной группой альдегида или кетона со свободной аминоруппой. Накопление ОШ дестабилизирует мембраны и способствует деструкции клеток [3,6,7]. Вещества, реагирующие с тиобарбитуровой кислотой, — еще одна группа продуктов окислительной деструкции липидов. Основным компонент этой группы МДА — маркер интенсивности свободнорадикального окисления, который активно взаимодействует с белками, вызывая их денатурацию.

Морозильное хранение является одним из основных методов консервации пищевого сырья и продуктов, при котором практически полностью прекращается микробиологическая порча, однако окисление жиров может продолжаться. Основная причина окисле-



ния липидов при морозильном хранении связана с протеканием реакции ферментативного липолиза [7,27].

В последние годы стало очевидно, что существуют значительные различия между окислительными процессами, происходящими в ТГ и в ФЛ. Последние являются более ненасыщенными, чем ТГ, а площадь поверхности, на которой они подвергаются воздействию водной фазы, содержащей прооксиданты, примерно в 50–100 раз превышает площадь поверхности жировых частиц ТГ [28,29]. Окисление ФЛ может в дальнейшем распространяться на фракцию ТГ в мышечной ткани [30,31]. Разделение жировой фракции на гептановую и изопропаноловую фазы делает возможным определение продуктов липопероксидации в различных классах липидов.

На Рисунке 3 показано влияние геля фукоидана и экстракта полифенолов на динамику окисления ТГ и ФЛ в образцах фарша горбуши при морозильном хранении.

Результаты показывают, что процессы окисления ТГ в контроле и при добавлении геля имеют сходный характер. Существенные различия появляются только к пятому месяцу хранения, когда величина индекса окисления ППО в первом случае растет, а во втором снижается. Для ВПО и ОШ в этих образцах различия незначительны. При добавлении экстракта при начальном снижении и ППО, и ВПО (2 месяца) имеет место наибольшее накопление этих компонентов к концу 5 месяцев хранения.

При рассмотрении динамики окисления ФЛ накопление ППО и ВПО наблюдается при сроке хранения 2 месяца, а затем также резко снижается. Максимальная величина этих показателей выявлена в образцах с добавлением экстракта.

На Рисунке 4 показана динамика накопления МДА, показателя, наиболее часто используемого для оценки интенсивности окислительных процессов, как в живых организмах, так и в пищевом сырье и продуктах. В этом случае наблюдаемые различия наиболее

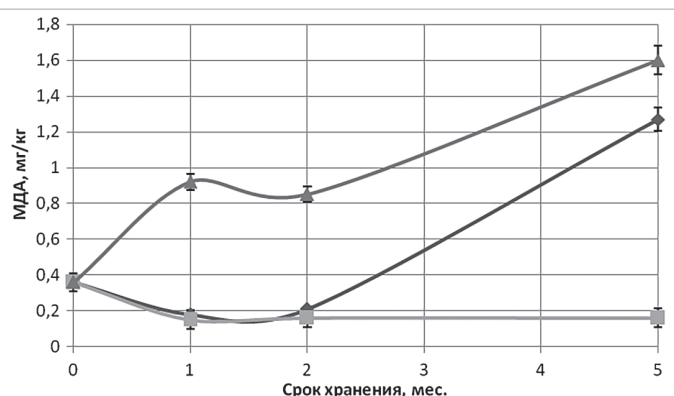


Рисунок 4. Динамика накопления МДА в образцах фарша горбуши при морозильном хранении (при температуре -18°C): контроль (♦), 10% геля (■), 0,05% экстракта (▲), $n = 4$, $p < 0,05$

Figure 4. Dynamics of MDA accumulation in the samples of humpback salmon minced meat during frozen storage (at a temperature of -18°C): control (♦), 10% of gel (■), 0.05% of the extract (▲), $n = 4$, $p < 0.05$

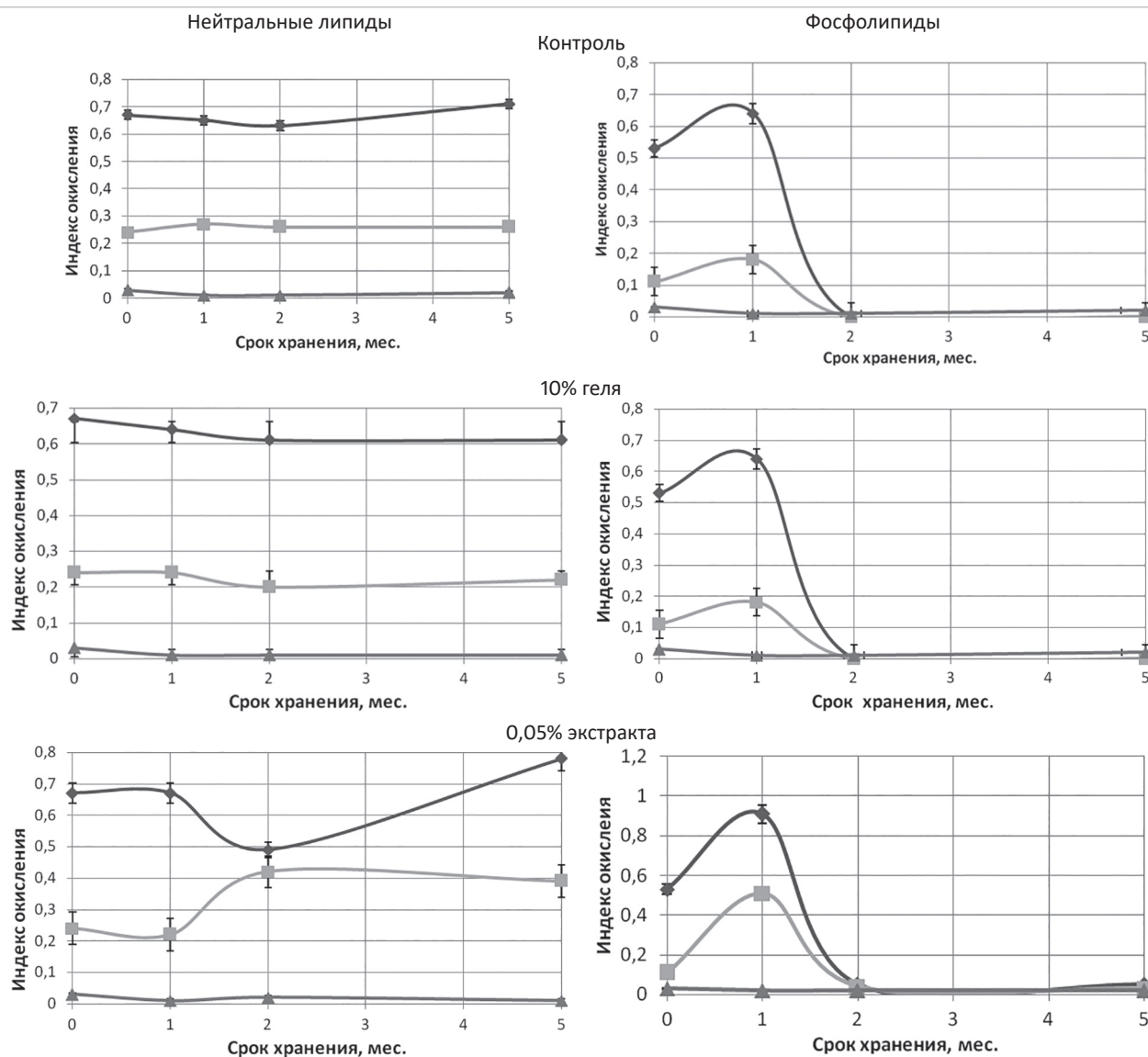


Рисунок 3. Динамика окисления липидов в образцах фарша горбуши при морозильном хранении (при температуре -18°C): первичные продукты окисления (♦), вторичные продукты окисления (■), основания Шиффа (▲), $n = 4$, $p < 0,05$

Figure 3. Dynamics of lipid oxidation in the samples of humpback salmon minced meat during frozen storage (at a temperature of -18°C): primary oxidation products (♦), secondary oxidation products (■), Schiff bases (▲), $n = 4$, $p < 0.05$

очевидны. Они позволяют говорить о выраженном защитном действии фукоидана, поскольку в образцах с его добавлением уровень МДА снизился к первому месяцу хранения и сохранял прежние значения в течение всего срока. Для контрольного образца после аналогичного снижения через 2 месяца происходил выраженный рост уровня МДА (в 2,5 раза).

После добавления экстракта наблюдали еще более высокую интенсивность процессов окисления, что позволяет говорить о проокислительном действии полифенолов фукуса в данной системе. При этом тенденция накопления МДА в целом совпадает с таковой для ППО во фракции ТГ. По данным ряда авторов, рыбные продукты, содержащие менее 0,58 мг МДА на 1 кг, воспринимаются как не прогорклые; при 0,58–1,51 мг/кг — как слегка прогорклые, но приемлемые; а при значениях выше 1,51 мг/кг — как прогорклые [3,28,30]. Полученные нами данные соответствуют этой шкале. Хранение образцов с добавлением геля продолжается.

Полученные результаты подтверждают, что начальные окислительные изменения затрагивают ФЛ, а затем распространяются на ТГ, в конечном итоге деградация гидроперекисей липидов приводит к увеличению выработки МДА. Фукоидан при добавлении в рыбный фарш проявил антиоксидантные свойства. Механизм АОА СП изучен недостаточно, однако есть предположения, что основное значение имеет реакция переноса электронов из отрицательно заряженных сульфатных групп СП [11,32]. Таким образом, выявлен защитный эффект фукоидана от повреждения радикалами путем инактивации супероксидных радикалов в мышечной ткани рыб.

Также очевидным является проокислительное действие водного экстракта полифенолов фукуса, ускоряющего процессы окисления в рыбном фарше. Доказано, что в зависимости от концентрации один и тот же антиоксидант может тормозить или ускорять окисление. Такие свойства по отношению к окислению липидов были уста-

новлены для токоферолов, витамина А, каротиноидов, убихинона и аскорбиновой кислоты [33].

4. Выводы

Итогом проведенных исследований является теоретическое и экспериментальное обоснование применения продуктов переработки фукусковых водорослей, а именно гелей, обработанных УЗ, для улучшения органолептических и реологических свойств рыбных фаршей, предлагаемых для получения формованных рыбных изделий. Кроме того, использование таких гелей способствует повышению устойчивости компонентов мышечной ткани рыб к окислительным процессам. Внесение гелей в состав фаршевых смесей из мышечной ткани горбуши обеспечило возможность регулирования их вязкоупругих характеристик (прочности, адгезивности и упругости), что оказало положительное влияние на консистенцию полуфабрикатов и готовых изделий. Стабилизация текстуры измельченной мышечной ткани рыб обеспечивается гидроколлоидной природой фукоидана и способностью к образованию собственной пространственной структуры. Внесение сухих экстрактов полифенолов привело к утрате способности к формообразованию, связанной с резким снижением водоудерживающей способности белков. Исследование динамики накопления ППО, ВПО, ОШ и МДА в процессе морозильного хранения показало, что начальные окислительные изменения в фарше горбуши затрагивают ФЛ, затем распространяются на ТГ, и в итоге ведут к накоплению МДА. При этом фукоидан обеспечил противодействие окислению липидов, а экстракт полифенолов проявил проокислительные свойства, что выразилось в образовании высоких концентраций МДА, создающих вкус и запахи прогорклости. Полученные результаты позволяют рекомендовать использование гелей фукоидана для создания функциональных продуктов и сохранения их качества при морозильном хранении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК/ REFERENCES

1. Пивненко, Т. Н. (2023). Функциональные свойства пищевых волокон и их применение в технологии рыбной продукции. *Пищевые системы*, 6(2), 235–244. [Pivnenko, T. N. (2023). Functional properties of the dietary fibers and their using in the manufacturing technology of fish products. *Food Systems*, 6(2), 235–244. (In Russian)] <https://doi.org/10.21525/2618-9771-2023-6-2-235-244>
2. Hematyar, N., Rustad, T., Sampels, S., Dalsgaard, T. K. (2019). Relationship between lipid and protein oxidation in fish. *Aquaculture Research*, 50(5), 1393–1403. <https://doi.org/10.1111/are.14012>
3. Secchi, G., Parisi, G. (2016). From farm to fork: Lipid oxidation in fish products. A review. *Italian Journal of Animal Science*, 15(1), 124–136. <https://doi.org/10.1008/1828051X.2015.1128687>
4. Eskicioglu, V., Kamiloglu, S., Nilufer-Erdil, D. (2015). Antioxidant dietary fibres: Potential functional food ingredients from plant processing by-products. *Czech Journal of Food Sciences*, 33(6), 487–499. <https://doi.org/10.17221/42/2015-CJFS>
5. Saura-Calixto, F. (1998). Antioxidant dietary fiber product: A new concept and a potential food ingredient. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(10), 4303–4306. <https://doi.org/10.1021/jf9803841>
6. Rahal, A., Kumar, A., Singh, V., Yadav, B., Tiwari, R., Chakraborty, S. et al. (2014). Oxidative stress, prooxidants, and antioxidants: The interplay. *BioMed Research International*, V. 2014, Article 761264. <https://doi.org/10.1155/2014/761264>
7. Undeland, I. (2016). Oxidative Stability of Seafood. Chapter in a book: *Oxidative Stability and Shelf Life of Foods Containing Oils and Fats*. Academic Press and AOCS Press, 2016. <http://doi.org/10.1016/B978-1-63067-056-6.00011-2>
8. Imbs, T. I., Ermakova, S. P. (2021). Can fucoidans of brown algae be considered as antioxidants? *Russian Journal of Marine Biology*, 47(3), 157–161. <https://doi.org/10.1134/S1063074021030056>
9. López-Marcos, M. C., Bailina, C., Viuda-Martos, M., Pérez-Alvarez, J. A., Fernández-López, J. (2015). Properties of dietary fibers from agroindustrial co-products as source for fiber-enriched foods. *Food and Bioprocess Technology*, 8, 2400–2408. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1591-z>
10. Mensah, E. O., Kanwugu, O. N., Panda, P. K., Adadi, P. (2023). Marine fucoidans: Structural, extraction, biological activities and their applications in the food industry. *Food Hydrocolloids*, 142, Article 108784. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108784>
11. Боголюбин, К. Г., Дружинина, А. С., Овчинников, Д. В., Паршина, А. Э., Шульгина, Е. В., Турова, П. Н. и др. (2019). Полифенолы арктических бурых водорослей: выделение, полимолекулярный состав. *Химия растительного сырья*, 4, 65–75. [Bogolitsin, K. G., Druzhinina, A. S., Ovchinnikov, D. V., Parshina, A. E., Shulgina, E. V., Turova, P. N. et al. (2019). Polyphenols of arctic brown algae: Extraction, polymolecular composition. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 4, 65–75. (In Russian)] <https://doi.org/10.14258/jcprm.2019045135>
12. Anisha, G. S., Padmakumari, S., Patel, A. K., Pandey, A., Singhania, R. R. (2022). Fucoidan from marine macroalgae: Biological actions and applications in regenerative medicine, drug delivery systems and food industry. *Bioengineering*, 9(9), Article 472. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9090472>
13. Hmelkov, A., Zvyagintseva, T., Shevchenko, N., Rasin, A. B., Ermakova, S. (2018). Ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from brown alga *Fucus evanescens*. Structure and biological activity of the new fucoidan fractions. *Journal of Applied Phycology*, 30(3), 2039–2046. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1342-9>
14. Thao My, P. L., Sung, V. V., Dat, T. D., Nam, H. M., Phong, M. T., Hieu, N. H. (2020). Ultrasound-assisted extraction of fucoidan from Vietnamese brown seaweed *Sargassum macleurei* and testing bioactivities of the extract. *ChemistrySelect*, 5(14), 4371–4380. <https://doi.org/10.1002/slct.201903818>
15. Suprunchuk, V. (2021). Ultrasonic-treated fucoidan as a promising therapeutic agent. *Polimers in Medicine*, 51(2), 85–90. <https://doi.org/10.17219/pim/143961>
16. Moroney, N. C., O'Grady, M. N., Lordan, S., Stanton, C., Kerry, J. P. (2015). Seaweed polysaccharides (Laminarin and Fucoidan) as functional ingredients in pork meat: An evaluation of anti-oxidative potential, thermal stability and bioaccessibility. *Marine Drugs*, 13(4), 2447–2464. <https://doi.org/10.3390/md13042447>
17. Вафина, Л.Х., Подкорытова, А. В. (2009). Новые продукты функционального питания на основе биоактивных компонентов морских водорослей. *Известия ТИНРО*, 156, 348–356. [Vafina, L. Kh., Podkorytova, A. V. (2009). New products of functional nutrition on the basis of bioactive substances from brown algae. *Izvestiya TINRO*, 156, 348–356. (In Russian)]
18. Пивненко, Т. Н., Позднякова, Ю. М., Есипенко, Р. В. (2024). Влияние сонификации на фракционный состав, физико-химические свойства и антиоксидантную активность функциональных гелей из фукусковых водорослей. *Научные труды Дальрыбвтуза*, 68(2), 6–18. [Pivnenko, T. N., Pozdnyakova, Yu. M., Esipenko, R. V. (2024). The influence of sonification on the fractional composition, physicochemical properties and antioxidant activity of functional fucus algae gels. *Scientific Journal of the Far East State Technical Fisheries University*, 68(2), 6–18. (In Russian)] <https://doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2024-68-01>
19. Табакаев, А. В., Табакаева, О. В. (2022). Сухие напитки на основе экстрактов бурых водорослей Японского моря и плодово-ягодных соков как функциональные продукты. *Вопросы питания*, 91(4), 107–114. [Tabakaev, A. V., Tabakaeva, O. V. (2022). Instant drinks based on extracts of Japan sea brown algae and fruit and berry juices as functional products. *Voprosy Pitaniia [Problems of Nutrition]*, 91(4), 107–114. (In Russian)] <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2022-91-4-107-114>
20. Qwele, K., Hugo, A., Oyedemi, S. O., Moyo, B., Masika, P. J., Muchenje, V. (2013). Chemical composition, fatty acid content and antioxidant potential of meat from goats supplemented with Moringa (*Moringa oleifera*) leaves, sunflower cake and grass hay. *Meat Science*, 93(3), 455–462. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.11.009>
21. Донская, Г. А., Креккер, Л. Г., Дрозжин, В. М., Колосова, Е. В. (2022). Перекисное окисление липидов и термообработка молока для приготовления кисломолочного продукта смешанного брожения. *Вестник КраСГАУ*, 5(182), 226–233. [Donskaya, G. A., Krekker, L. G., Drozhzhin, V. M., Kolosova, E. V. (2022). Lipid peroxidation and milk heat treatment to prepare fermented milk product of mixed fermentation. *Bulletin of KSAU*, 5(182), 226–233. (In Russian)] <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-5-226-233>
22. Ulu, H. (2004). Evaluating of three 2-thiobarbituric acid methods for the measurement of lipid oxidation in various meats and meat products. *Meat Science*, 67(4), 683–687. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2003.12.014>
23. Ogutu, F. O., Mu, T.-H., Elahi, R., Zhang, M., Sun, H.-N. (2015). Ultrasonic modification of selected polysaccharides — review. *Journal of Food Processing and Technology*, 6, Article 446. <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000446>
24. Montero, P., Hurtado, J. L., Pérez-Mateos, M. (2000). Microstructural behaviour and gelling characteristics of myosystem protein gels interacting with hydro-

- colloids. *Food Hydrocolloids*, 14(5), 455–461. [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(00\)00025-4](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(00)00025-4)
25. Cortez-Trejo, M. C., Gaytan-Martinez, M., Reyes-Vega, M. L., Mondoza, S. (2021) Protein-gum-based gels: Effect of gum addition on microstructure, rheological properties, and water retention capacity. *Trends in Food Science and Technology*, 116, 303–317. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.07.030>
 26. Alipour, H. J., Rezaei, M., Shabanpour, B., Tabarsa, M. E. (2018). Effects of sulfated polysaccharides from green alga *Ulva intestinalis* on physicochemical properties and microstructure of silver carp surimi. *Food Hydrocolloids*, 74, 87–96. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.07.038>
 27. Etemadian, Y., Shabanpour, B. (2014). Changes in physicochemical properties and shelf life bility of kutum (*Rutilus frisiikutum*) slices during packaging and storage in ice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38(1), 159–168. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2012.00760.x>
 28. Hultin, H. O. (1994). Oxidation of lipids in seafoods. Chapter in a book: Seafoods: Chemistry, Processing Technology and Quality. Springer, Boston, MA, 1994. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2181-5_5
 29. Geng, L., Liu, K., Zhang, H. (2023) Lipid oxidation in foods and its implications on proteins. *Frontiers in Nutrition*, 10, Article 1192199. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1192199>
 30. Ashton, I. (2002). Understanding lipid oxidation in fish. Chapter in a book: Safety and Quality Issues in Fish Processing. Woodhead Publishing Ltd, Cambridge, UK, 2002. <https://doi.org/10.1533/9781855736788.2.254>
 31. Lu, H. F. S., Nielsen, N. S., Baron, C. P., Jacobsen, C. (2017). Marine phospholipids: The current understanding of their oxidation mechanisms and potential uses for food fortification. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(10), 2057–2070. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.925422>
 32. Pozharitskaya, O. N., Obluchinskaya, E. D., Shikov, A. N. (2020). Mechanisms of bioactivities of fucoidan from the brown seaweed *Fucus vesiculosus* L. of the Barents Sea. *Marine Drugs*, 18, Article 275. <https://doi.org/10.3390/md18050275>
 33. Andrés, C. M. C., de la Lastra, J. M. P., Juan, C. A., Plou, F. J., Pérez-Lebeña E. (2023). Polyphenols as antioxidant/pro-oxidant compounds and donors of reducing species: Relationship with human antioxidant metabolism. *Processes*, 11(9). Article 2771. <https://doi.org/10.3390/pr11092771>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Пивненко Татьяна Николаевна — доктор биологических наук, профессор, профессор, кафедра «Пищевая биотехнология», Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет (Дальрыбвтуз) 690087, Владивосток, Луговая, 52-Б Тел.: +7–924–230–25–34 E-mail: tnpivnenko@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0330-489X Позднякова Юлия Михайловна — кандидат технических наук, директор НИИ инновационных биотехнологий, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет (Дальрыбвтуз) 690087, Владивосток, Луговая, 52-Б Тел.: +7–924–233–30–29 E-mail: pozdnyakova.julia@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9078-0850 Есипенко Роман Владимирович — кандидат технических наук, научный сотрудник, научно-инновационный центр «Морские биотехнологии», Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет («Дальрыбвтуз») Тел. +7–914–710–18–71 E-mail: azt@bk.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8263-6939	Pivnenko Tatiana Nikolaevna, Doctor of Biological Sciences, Professor, Professor, Department «Food Biotechnology», Far Eastern State Technical Fisheries University (Dalrybvtuz) 52-B, Lugovaya str., Vladivostok, 690087, Russia Tel.: +7–924–230–25–34 E-mail: tnpivnenko@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0330-489X Pozdnyakova Yuliya Mikhaylovna, Candidate of Technical Sciences, Director, Innovative Biotechnologies Institute, Far Eastern State Technical Fisheries University («Dalrybvtus») 52-B, Lugovaya str., Vladivostok, 690087, Russia Tel.: +79–24–233–30–29 E-mail: pozdnyakova.julia@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9078-0850 Esipenko Roman Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Researcher, Scientific and Innovation Center «Marine Bio-technologies», Far Eastern State Technical Fisheries University («Dalrybvtus») 52-B, Lugovaya str., Vladivostok, 690087, Russia Tel.: +7–914–710–18–71, E-mail: azt@bk.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8263-6939
Критерии авторства	Contribution
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.