

ИЗВЕСТИЯ

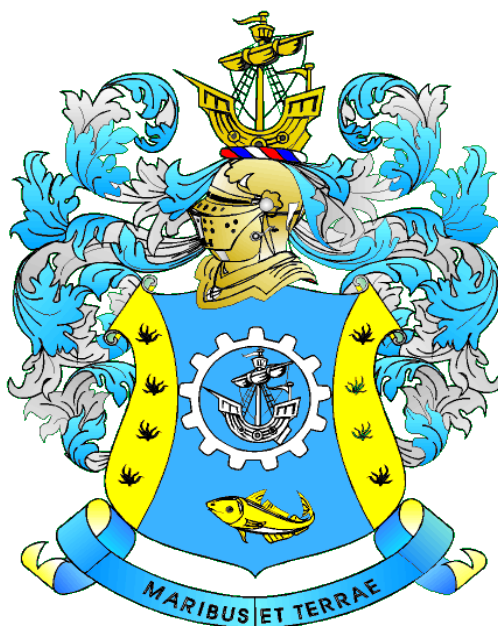
КГТУ

2025

№ 79

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

Научный журнал



Индексирование журнала, включение в базы данных

*Входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых
должны быть опубликованы основные научные результаты
диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на
соискание ученой степени доктора наук*

Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)

Agricultural Research Information System (Agris)

Калининград

Редакционная коллегия:

Главный редактор: Н. А. Кострикова, канд. физ.-мат. наук, доц., проректор по научной работе;

Заместитель главного редактора: В. А. Наумов, д-р техн. наук, проф. кафедры техносферной безопасности и природообустройства.

Члены редакционной коллегии:

О. В. Агеев, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры инжиниринга технологического оборудования, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

И. С. Александров, д-р техн. наук, доц., директор Института морских технологий, энергетики и строительства, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

С. Т. Антипов, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, г. Воронеж, Россия;

О. А. Анциферова, д-р с.-х. наук, доц., проф. кафедры агрономии и агроэкологии, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

А. Г. Архипов, д-р биол. наук, доц., научный координатор, Атлантический филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АтлантНИРО»), г. Калининград, Россия;

О. О. Бабищ, д-р техн. наук, доц., директор Института живых систем, Балтийский федеральный университет имени И. Канта, г. Калининград, Россия;

А. С. Баркова, д-р вет. наук, доц., заведующая кафедрой производства и экспертизы качества сельскохозяйственной продукции, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

О. М. Бедарева, д-р биол. наук, проф., заведующая кафедрой агрономии и агроэкологии, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

В. Ф. Белей, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой энергетики, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

В. В. Брюханов, д-р физ.-мат. наук, проф., ведущий научный сотрудник НОЦ «Фундаментальная и прикладная фотоника. Нанопотоника», Балтийский федеральный университет имени И. Канта, г. Калининград, Россия;

О. А. Булатов, д-р биол. наук, проф., директор по научной работе, Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО), г. Москва, Россия;

Н. Л. Великанов, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой судостроения, судоремонта и морской техники, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

В. В. Верхотуров, д-р биол. наук, проф., директор Института агроинженерии и пищевых систем, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

А. А. Герасимов, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры строительства, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

В. И. Гнатюк, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры энергетики, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

Е. М. Грамузов, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры кораблестроения и авиационной техники, Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия;

В. В. Дорофеева, д-р экон. наук, проф., заведующая кафедрой менеджмента, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

Л. С. Дышлюк, д-р техн. наук, доц., старший научный сотрудник, Балтийский федеральный университет имени И. Канта, г. Калининград, Россия;

С. В. Дятченко, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры судостроения, судоремонта и морской техники, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

А. В. Иванов, д-р экон. наук, проф., проф. кафедры менеджмента, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

И. П. Корнева, канд. техн. наук, доц., проф. кафедры физики, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

О. В. Кригер, д-р техн. наук, доц., проф. Института живых систем, Балтийский федеральный университет имени И. Канта, г. Калининград, Россия;

Е. А. Криксунов, член-корреспондент РАН, д-р биол. наук, проф., заведующий лабораторией онтогенеза кафедры ихтиологии, МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия;

С. Н. Лябзина, д-р биол. наук, доц., проф. кафедры зоологии и экологии, Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск, Россия;

О. Я. Мезенова, д-р техн. наук, проф., заведующая кафедрой пищевой биотехнологии, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

А. Г. Мнацаканян, д-р экон. наук, проф., директор Института отраслевой экономики и управления, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

А. Б. Муромцев, д-р вет. наук, проф., Калининградский институт переподготовки кадров агробизнеса, г. Калининград, Россия;

Е. Н. Науменко, д-р биол. наук, доц., проф. кафедры водных биоресурсов и аквакультуры, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

Никитас Никитакос, проф., Морская академия, г. Шарджа, Объединенные Арабские Эмираты;

В. А. Панфилов, акад. РАН, д-р техн. наук, проф., профессор кафедры процессов и аппаратов перерабатывающих производств, Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К. А. Тимирязева, г. Москва, Россия;

А. И. Притыкин, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры строительства, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

Л. И. Сергеев, д-р экон. наук, проф., заведующий кафедрой экономической теории и инструментальных методов, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

Н. Я. Синявский, д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий кафедрой физики, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

В. А. Слежкин, канд. хим. наук, доц., доц. кафедры химии, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

А. В. Снытников, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры прикладной информатики, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

Т. Е. Степанова, д-р экон. наук, проф., заведующая кафедрой экономической безопасности, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

С. В. Супрунова, выпускающий редактор;

В. И. Сутырин, д-р техн. наук, доц., проф. образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий», Балтийский федеральный университет имени И. Канта, г. Калининград, Россия;

О. Я. Тимофеев, д-р техн. наук, проф., декан факультета кораблестроения и океанотехники, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, г. Санкт-Петербург, Россия;

Е. В. Ульрих, д-р техн. наук, доц., заместитель директора Института агроинженерии и пищевых систем по научной и международной деятельности, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

С. В. Федоров, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой теории механизмов и машин и деталей машин, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

А. В. Юров, д-р физ.-мат. наук, проф., директор образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий», Балтийский федеральный университет имени И. Канта, г. Калининград, Россия.

Адрес редакции: 236022, г. Калининград, Советский проспект, 1;

тел.: (4012) 99-59-01, 99-59-10, 99-59-74; факс: (4012) 91-68-46;

сайт: www.klgtu.ru; E-mail: svetlana.suprunova@klgtu.ru

© ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
2025



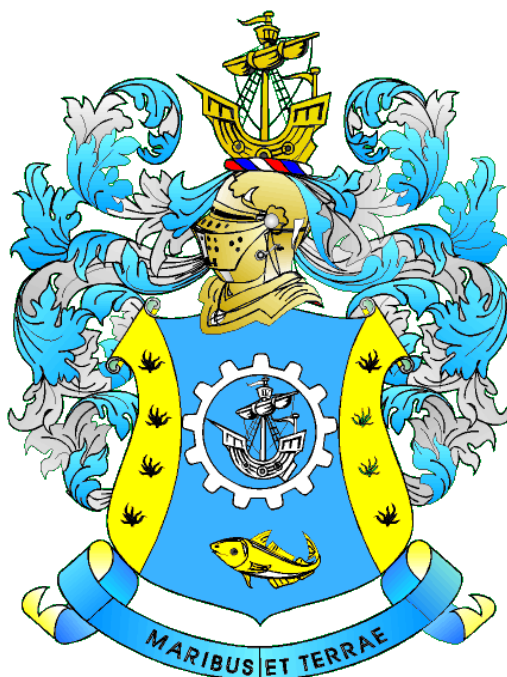
KSTU NEWS

2025

№ 79

FEDERAL STATE BUDGETARY EDUCATIONAL
INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION
«KALININGRAD STATE TECHNICAL UNIVERSITY»

SCIENTIFIC JOURNAL



Journal index, registration in databases

Included in the list of peer-reviewed scientific publications, in which the main scientific results of dissertations for the candidate of science degree and for the doctor of science degree should be published

Russian Index of Scientific Citation (RISC)

Agricultural Research Information System (Agris)

Kaliningrad

СОДЕРЖАНИЕ

Биология, экология и рыбное хозяйство

<i>Василискова А. В., Кондратенко С. В.</i> Гидробиологические исследования водных экосистем, расположенных в районах полигонов твердых коммунальных отходов	11
<i>Генрих Э. А., Боровской А. В., Пастухов С. В., Торцев А. М., Владыкина Н. С.</i> Результаты мониторинга нерестовой части популяции сига обыкновенного (<i>Coregonus lavaretus</i> L.) в нижнем течении р. Печоры в 2024 г.	26
<i>Моисеева А. И.</i> Видовой состав гетеротрофных микробных сообществ оз. Виштынецкого Калининградской области в июне 2022–2023 гг.	39
<i>Федорова Г. А., Никонова А. А., Белых О. А., Глызина О. Ю.</i> Исследование пула жирных кислот в мышцах радужной форели <i>Parasalmo mykiss</i> (Walbaum, 1792) из садковой аквакультуры (р. Ангара, г. Иркутск)	54

Техника и технология пищевых производств

<i>Андрюхин А. В., Винокур М. Л., Галдукевич В. А., Морозов И. О.</i> Исследование влияния промывки фарша электрохимически активированным раствором хлорида натрия и вида используемого эмульгатора на качество рыбных полуфабрикатов, обогащенных крилевым жиром	71
<i>Миленький А. В., Агафонова С. В.</i> Эмульсионный соус, обогащенный продуктами переработки вторичного сырья лососевых рыб, стабилизированный растительными компонентами	84
<i>Черепанов И. С., Новоселова Д. В.</i> Исследование термически индуцированных структурных превращений D-маннита методами молекулярной спектроскопии	99

Судостроение, машиностроение и энергетика

<i>Романюта Д. А., Ариенчук А. С.</i> К вопросу о расчете жесткой прямоугольной изотропной пластины с жестко закрепленным контуром под действием сосредоточенной нагрузки в центре пластины	113
---	-----

CONTENT

Biology, ecology and fisheries

<i>Vasiliskova A. V., Kondratenko S. V.</i> Hydrobiological studies of aquatic ecosystems located in areas of municipal solid waste landfills	11
<i>Genrikh E. A., Borovskoy A. V., Pastukhov S. V., Tortsev A. M., Vladykina N. S.</i> Monitoring results of the spawning part of the whitefish (<i>Coregonus lavaretus</i> L.) population in the lower reaches of the Pechora River in 2024	26
<i>Moiseeva A. I.</i> Species composition of the heterotrophic microbial communities of Lake Vishtynetskoe of the Kaliningrad region in June 2022–2023	39
<i>Fedorova G. A., Nikonova A. A., Belykh O. A., Glyzina O. Yu.</i> Study of fatty acids in the muscles of garden aquaculture rainbow trout <i>Parasalmo mykiss</i> (Angara river, Irkutsk)	54

Processes and technology of food manufacturing

<i>Andriukhin A. V., Vinokur M. L., Galdukevich V. A., Morozov I. O.</i> Study of the efficiency of washing minced fish with an electrically activated sodium chloride solution and the type of emulsifiers on the quality of fish semi-finished products enriched with krill oil	71
<i>Milenkiy A. V., Agafonova S. V.</i> Emulsion sauce enriched with products of processing of salmon fish waste and stabilized with vegetable components	84
<i>Cherepanov I. S., Novoselova D. V.</i> Study of thermal induced structural transformations of <i>D</i> -mannitol using molecular spectroscopy methods	99

Shipbuilding, machine manufacturing and power engineering

<i>Romanyuta D. A., Arienchuk A. S.</i> On the issue of calculating a rigid rectangular isotropic plate with a rigidly fixed contour under the action of a concentrated load in the center of the plate	113
---	-----

БИОЛОГИЯ, ЭКОЛОГИЯ И РЫБНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Научная статья
УДК 504.4.054
DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-11-25

**Гидробиологические исследования водных экосистем, расположенных
в районах полигонов твердых коммунальных отходов**

Александра Владимировна Василискова¹✉, Сергей Валентинович Кондратенко²

^{1,2} Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

¹ aleksandra.minashkina@klgtu.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-8002-5731>

² sergej.kondratenko@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6870-4889>

Аннотация. Исследования водных объектов вблизи полигонов твердых коммунальных отходов (ТКО), как правило, ограничиваются гидрохимическими параметрами, но так как эти параметры подвержены частой изменчивости, а негативное воздействие полигонов ТКО может происходить в течение длительного времени, необходимо применение наиболее «постоянных» показателей. Предлагается расширить перечень исследуемых параметров за счет гидробиологических, так как гидробионты являются хорошими биоиндикаторами среды, а применение различных индексов позволяет более точно определить характер и последствия загрязнения фильтрационными водами полигонов ТКО водных объектов. В статье представлены результаты качественного и количественного исследования зоопланктона и зообентоса трех водных объектов (одного фонового и двух, вероятно, подвергавшихся негативному воздействию) в рамках экологического мониторинга влияния полигона ТКО г. Калининграда на водные экосистемы. Качественный состав зоопланктона и зообентоса выявил типичных представителей для данного ареала, представляющих по большей части эвтрофные организмы. Также была проведена оценка загрязненности исследуемых водных объектов с применением метода индикаторных организмов Пантле-Букка в модификации Сладечека, являющегося достаточно простым и часто используемым. Произведенные расчеты позволили выявить состояние водных экосистем, при котором водные объекты сохраняют высокое видовое разнообразие и биомассу зоопланктона и зообентоса. Исследуемые водные объекты в соответствии с градацией можно охарактеризовать как водоемы средней степени загрязненности. Наиболее загрязненным является ближайший к полигону пруд без названия, расположенный в 400 м и представляющий по сути буферную зону между полигоном ТКО и Калининградским заливом.

Ключевые слова: полигон, твердые коммунальные отходы, загрязняющие вещества, водные экосистемы, мониторинг, зоопланктон, зообентос.

Для цитирования: Василискова А. В., Кондратенко С. В. Гидробиологические исследования водных экосистем, расположенных в районах полигонов твердых коммунальных отходов // Известия КГТУ. 2025. № 79. С. 11-25. DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-11-25.

Original article

Hydrobiological studies of aquatic ecosystems located in areas of municipal solid waste landfills

Aleksandra V. Vasiliskova^{1✉}, Sergey V. Kondratenko²

^{1,2} Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

¹ aleksandra.minashkina@klgtu.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-8002-5731>

² sergej.kondratenko@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6870-4889>

Abstract. Studies of water bodies near MSW landfills are usually limited to hydrochemical parameters. However, since hydrochemical parameters are subject to frequent variability, and the negative effects of MSW landfills can occur over a long period of time, it is necessary to use the most "constant" indicators. It is proposed to expand the list of the studied parameters at the expense of hydrobiological ones, since hydrobionts are good bioindicators of the environment, and the use of various indices makes it possible to more accurately determine the nature and consequences of pollution by filtration waters of MSW landfills of water bodies. The article presents the results of a qualitative and quantitative study of zooplankton and zoobenthos from three water bodies (one background and two likely to be adversely affected) as part of the environmental monitoring of the impact of the Kaliningrad MSW landfill on aquatic ecosystems. The qualitative composition of zooplankton and zoobenthos revealed typical representatives for this area, mostly eutrophic organisms. An assessment of the contamination of the studied water bodies has also been carried out using the Pantle-Bucca method of indicator organisms modified by Sladечek, which is quite simple and often used in application. The calculations have made it possible to identify the state of aquatic ecosystems, in which water bodies retain high species diversity and biomass of zooplankton and zoobenthos. The studied water bodies, according to the gradation, can be characterized as "medium pollution". The most "polluted" is the nearest water body to the MSW landfill (a second-hand pond 400 m from the landfill), which is essentially a "buffer zone" between the MSW landfill and the Kaliningrad Bay.

Keywords: landfill, municipal solid waste, pollutants, aquatic ecosystems, monitoring, zooplankton, zoobenthos.

For citation: Vasiliskova A. V., Kondratenko S. V. Hydrobiological studies of aquatic ecosystems located in areas of municipal solid waste landfills. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2025;(79):11–25. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-11-25.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема техногенного загрязнения водных экосистем достаточно актуальна на сегодняшний день. Одними из загрязнителей являются свалки и полигоны твердых коммунальных отходов (ТКО) [1]. В случаях несанкционированно размещенных либо без соблюдения экологических требований свалок и полигонов возможно поступление в окружающую среду неочищенных фильтрационных вод полигона (далее – фильтрат), что может оказать негативное воздействие на окружающую природную среду [2].

Однако остается нерешенным вопрос, как оценить характер загрязнения, если произошел разлив фильтрата и, например, на протяжении длительного времени загрязняющие вещества попадали в водные экосистемы, как в случае с полигоном ТКО г. Калининграда (далее – полигон ТКО) [3].

Как правило, мониторинг полигонов ТКО ограничивается физико-химическими испытаниями по установленному программой мониторинга набору параметров самого фильтрата, подземных вод из скважин, свалочного грунта, почв вблизи территории полигона и атмосферного воздуха [4]. В случае расположения пруда-отстойника на территории полигонов ТКО также могут анализироваться пробы воды и донных отложений этих объектов.

В водных экосистемах в отдельных случаях могут исследоваться донные отложения и поверхностные воды, при этом сами обитатели экосистем (гидробионты) остаются без внимания. Мы же предлагаем расширить программу мониторинга влияния полигонов ТКО на водные экосистемы за счет гидробиологического анализа [3], так как растворенные вещества и взвеси будут влиять на видовой состав, численность и биомассу зоопланктона, а органические и неорганические осадки – на параметры зообентоса.

Качественный и количественный анализ зоопланктона и зообентоса позволяет сделать мониторинг более точным и подробным, так как гидрохимические показатели подвержены частой изменчивости [5], а гидробиологические – более стабильны.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках экологического мониторинга полигона ТКО в период с 2019 по 2022 гг. был произведен отбор гидробиологических проб (зоопланктон и зообентос) в трех водных объектах вблизи полигона ТКО (рис. 1) – одном фоновом (оз. Свалка) и двух (пруд без названия и часть Калининградского залива), предположительно подвергавшихся негативному воздействию фильтратов полигона ТКО.



Рис. 1. Карта-схема расположения исследуемых водных объектов
Fig. 1. Outline map of the studied water bodies

Оз. Свалка является обводненным бывшим карьером по добыче песка и располагается почти в 1,7 км от полигона ТКО. Обводнение этого участка началось в 40-х гг. XX в., и к его концу озеро приобрело нынешний вид.

Пруд без названия появился в период 45–55-х гг. прошлого века и находится на территории бывших торфяников. Располагается в 0,4 км от полигона ТКО, часть пруда входит в санитарно-защитную зону полигона.

Исследуемый участок Калининградского залива намного старше других исследуемых водных объектов и присутствует на архивных картах конца XVIII в., сформировался в ходе природных процессов и располагается в 1 км от полигона ТКО.

Все исследуемые водные объекты являются рыбохозяйственными и часто используются в качестве объекта любительского рыболовства, а Калининградский залив, помимо любительского, – в качестве промышленного и научного рыболовства.

Сам полигон ТКО официально эксплуатировался с 60-х гг. XX в., в 2019 г. закончились работы по его рекультивации.

Отбор проб на исследуемых водных объектах проводился раз в месяц в течение всего мониторинга (2019–2022 гг.) на каждом из объектов с последующим анализом в лаборатории кафедры водных биоресурсов и аквакультуры ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» (далее – КГТУ).

Отбор гидробиологических проб производился по общепринятым методикам. Пробы зоопланктона были собраны при помощи конической планктонной сети из мельничного газа № 70, через которую процеживалось 100 л воды [6], после чего осевший зоопланктон переносили в емкости и фиксировали 4 %-ым раствором формальдегида. Пробы зообентоса отбирали скребком с длиной режущей стороны

0,24 м [7] по 3 пробы со станции и собирали в отдельные емкости. Далее емкости доставляли в лабораторию КГТУ для последующего разбора и фиксации. Камеральную обработку проб проводили в лаборатории кафедры водных биоресурсов и аквакультуры КГТУ по соответствующим пособиям [8–10]. Зоопланктон и зообентос определяли до вида, в некоторых случаях – до рода.

Оценка экологического состояния [11] водоема проведена с использованием метода индикаторных организмов Пантле-Букка в модификации Сладечека (S) по формуле:

$$S = \frac{\sum(s * h)}{\sum h}, \quad (1)$$

где h – обилие каждого вида; s – индивидуальный индекс сапробности.

Сапробность таксона s показывает, в водах какой степени загрязненности он обычно встречается. Обилие (H) оценивается как (2):

$$H = \frac{h}{\sum l}, \quad (2)$$

где h – численность экземпляров/м³; l – сумма всех экземпляров/м³.

Полученные значения применяемого индекса Пантле-Букка в модификации Сладечека сопоставлялись с градацией зон сапробности: 4.0–3.5 – полисапробная зона; 3.5–2.5 – α -мезосапробная зона; 2.5–1.5 – β -мезосапробная зона; 1.5–1.0 – олигосапробная зона; 0.5–0 – ксеносапробные воды.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Зоопланктон

За весь период (2019–2022 гг.) в исследуемых водных объектах были определены виды и формы зоопланктона, относящиеся к трем таксономическим группам: тип *Rotifera* (коловратки), подкласс *Copepoda* (веслоногие рачки) и надотряд *Cladocera* (ветвистоусые рачки). Таксономическая структура рассматриваемого периода не претерпевала сильных изменений во всех водных объектах.

В оз. Свалка идентифицировано 38 видов и форм зоопланктона, относящихся к трем таксономическим группам: тип *Rotifera* (коловратки) (7), подкласс *Copepoda* (веслоногие рачки) (16) и надотряд *Cladocera* (ветвистоусые рачки) (15).

В пруду без названия определено 44 вида и форм зоопланктона, относящихся к трем таксономическим группам: тип *Rotifera* (коловратки) (9), подкласс *Copepoda* (веслоногие рачки) (22) и надотряд *Cladocera* (ветвистоусые рачки) (13).

В Калининградском заливе было идентифицировано 32 вида и форм зоопланктона, относящихся к трем таксономическим группам: тип *Rotifera* (коловратки) (6), подкласс *Copepoda* (веслоногие рачки) (17) и надотряд *Cladocera* (ветвистоусые рачки) (9). Так как пробы отбирались в точке соединения Калининградского залива с канавой, расположенной между заливом и прудом без названия, и присутствовало постоянное волнение, число видов могло быть ограничено.

Разнообразие зоопланктона в исследованных водоемах изменялось от 32 до 44 видов (рис. 2).

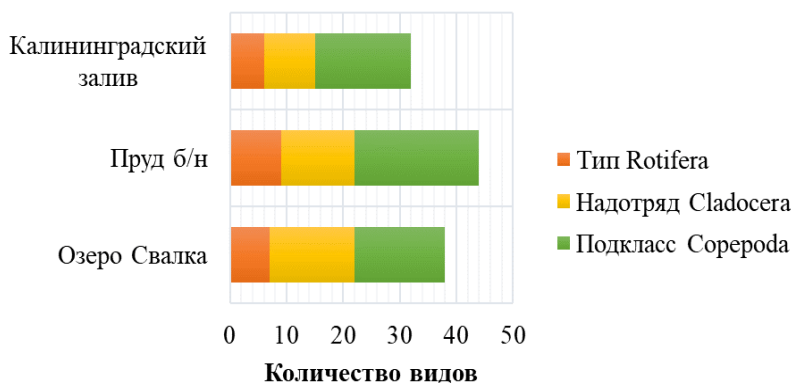


Рис. 2. Разнообразие видов зоопланктона в исследуемых водных объектах (количество видов)

Fig. 2. Diversity of zooplankton species in the studied water bodies (number of species)

В более мелком водном объекте, пруду без названия, наблюдалось максимальное разнообразие зоопланктона (44 вида). Подобная тенденция может быть связана с небольшой проточностью водоема. Во всех водоемах более широко представлен подкласс *Copepoda* (веслоногие рачки).

При большом видовом разнообразии в пруду без названия наибольшая численность была отмечена в оз. Свалка, а наименьшая – в Калининградском заливе.

Численность подкласса *Copepoda* превышала численность других таксономических групп во всех водных объектах.

Доминирующим видом во всех водных объектах являлся *Thermocyclops crassus*, который чаще других обнаруживали в пробах.

В целом во всех исследуемых водных объектах доминирующий комплекс видов был представлен преимущественно мелкими видами эвтрофных водоемов, массовое развитие которых характерно для летнего периода.

Наименьшая биомасса зоопланктона наблюдалась в оз. Свалка, максимальная – в Калининградском заливе, что связано с наличием крупных представителей подкласса *Copepoda*, имеющих большую биомассу.

Структура численности и биомассы в процентном соотношении исследуемых водных объектов представлена на рис. 3–4.

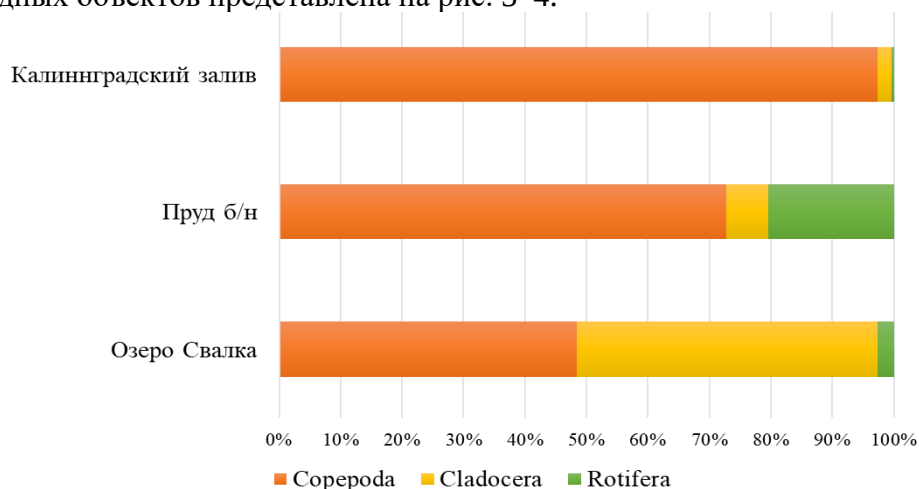


Рис. 3. Структура зоопланктонного сообщества по биомассе, %

Fig. 3. Structure of the zooplankton community by biomass, %

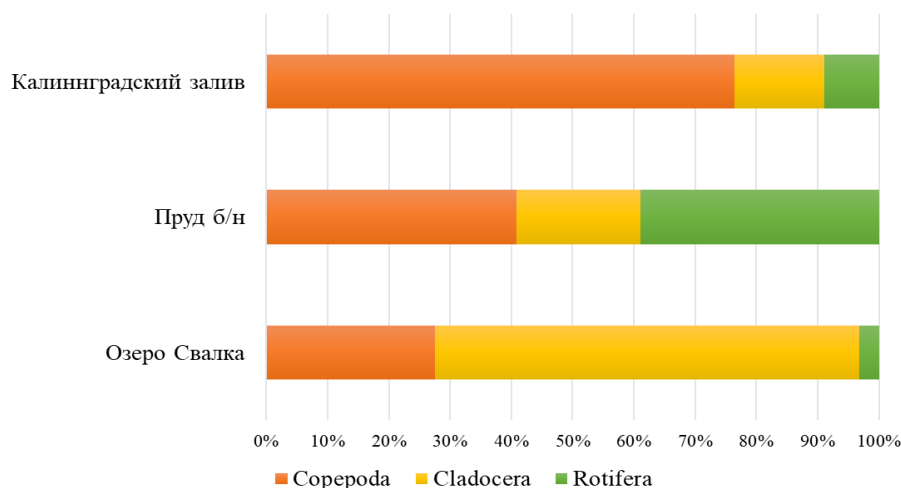


Рис. 4. Структура зоопланктонного сообщества по численности, %
Fig. 4. Structure of the zooplankton community by number, %

Распределение зоопланктона в процентном соотношении было различным. Так, например, в оз. Свалка по биомассе подкласс *Copepoda* и надотряд *Cladocera* отмечались примерно в равном соотношении, процент типа *Rotifera* относительно двух других групп был очень мал. Почти такая же структура зафиксирована и по численности, но процент надотряда *Cladocera* был выше.

В пруду без названия по биомассе наибольший процент занимал подкласс *Copepoda*, при этом по численности подкласс *Copepoda* и тип *Rotifera* находились примерно в равных количествах. Наименьшую численность и биомассу в пруду без названия составлял надотряд *Cladocera*.

В Калининградском заливе наибольшей процент в соотношении занимал подкласс *Copepoda* и по численности, и по биомассе, остальные группы составляли меньший процент от общего числа и биомассы.

Значения индекса сапробности Пантле-Букка для зоопланктона во всех исследуемых водоемах изменялись в диапазоне 1,24–2,25.

В оз. Свалка среднее значение индекса сапробности Пантле-Букка составляло 1,65, в пруду – 1,59, в Калининградском заливе – 1,63.

Зообентос

За весь период (2019–2022 гг.) в исследуемых водных объектах были определены виды и формы зообентоса, относящиеся к 12 систематическим группам: тип *Mollusca*, подкласс *Oligochaeta*, подкласс *Hirudinea*, класс *Crustacea*, семейство *Chironomidae*, отряд *Ephemeroptera*, отряд *Odonata*, отряд *Trichoptera*, отряд *Diptera*, отряд *Hemiptera*, подотряд *Heteroptera* и условная группа «прочие».

В оз. Свалка было идентифицировано 89 видов из 12 систематических групп: тип *Mollusca* (17), подкласс *Oligochaeta* (3), подкласс *Hirudinea* (6), класс *Crustacea* (1), семейство *Chironomidae* (26), отряд *Ephemeroptera* (3), отряд *Odonata* (7), отряд *Trichoptera* (13), отряд *Diptera* (2), отряд *Hemiptera* (1), подотряд *Heteroptera* (1) и условная группа «прочие» (9).

В пруду без названия определено 45 видов из 11 систематических групп: тип *Mollusca* (7), подкласс *Oligochaeta* (3), подкласс *Hirudinea* (7), класс *Crustacea* (3), семейство *Chironomidae* (13), отряд *Ephemeroptera* (2), отряд *Odonata* (4), отряд *Trichoptera* (2), отряд *Diptera* (1), отряд *Hemiptera* (2) и условная группа «прочие» (1).

В Калининградском заливе выявлен 31 вид из 6 систематических групп: тип *Mollusca* (5), подкласс *Oligochaeta* (1), класс *Crustacea* (6), семейство *Chironomidae* (16), отряд *Odonata* (1) и условная группа «прочие» (2).

Видовое разнообразие зообентоса в исследованных водоемах изменялась от 31 до 89 видов (рис. 5).

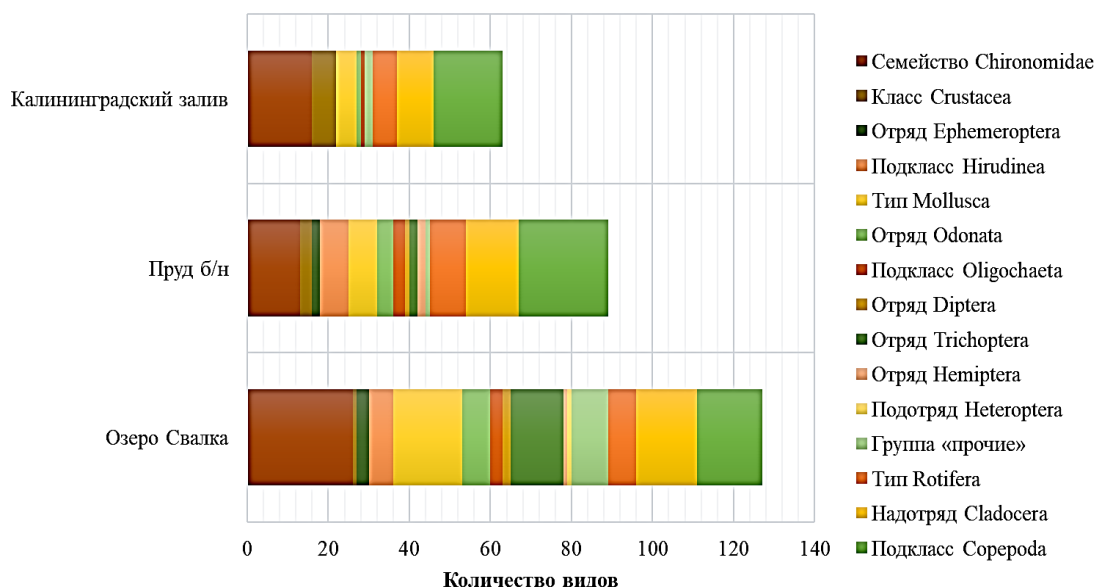


Рис. 5. Разнообразие зообентоса в исследуемых водных объектах
(количество видов)

Fig. 5. Diversity of zoobenthos in the studied water bodies (number of species)

В более крупном водном объекте, Калининградском заливе, разнообразие зообентоса было несколько меньше, чем в более мелких и пресноводных водоемах. Это объяснялось волнением и выбором станции отбора проб, так как в открытой акватории видовое разнообразие было бы выше. Максимальное разнообразие зообентоса среди исследованных водоемов наблюдалось в оз. Свалка (89 видов). Практически во всех водоемах более широко было представлено семейство *Chironomidae*.

Наибольшая численность зообентоса среди исследованных водных объектов отмечена в пруду без названия, наименьшая – в Калининградском заливе.

Численность семейства *Chironomidae* превышала численность других групп зообентоса во всех водных объектах.

Доминирующим видом в рассматриваемых водных объектах являлся *Chironomus dorsalis*, который чаще других обнаруживали в пробах.

Во всех водных объектах доминирующий комплекс видов был представлен преимущественно мелкими видами эвтрофных водоемов, массовое развитие которых характерно для весенне-летнего периода.

Наименьшая биомасса зообентоса наблюдалась в Калининградском заливе, а максимальная – в оз. Свалка, что связано с наличием крупных представителей типа *Mollusca*, имеющих большую биомассу.

Структура численности и биомассы зообентоса в процентном соотношении исследуемых водных объектов представлена на рис. 6–7.

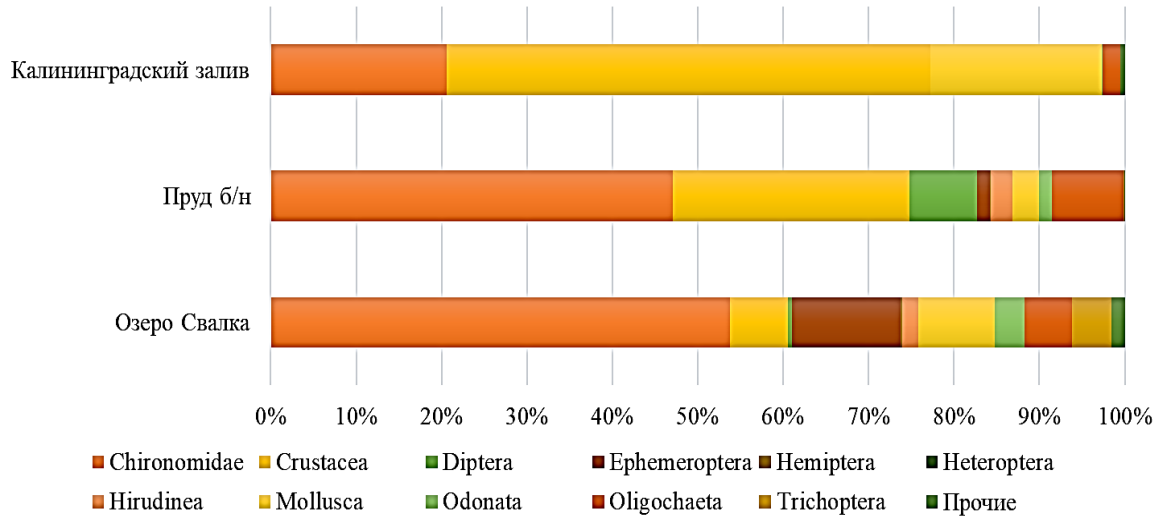


Рис. 6. Структура зообентосного сообщества по численности, %
Fig. 6. Structure of the zoobenthos community by number, %

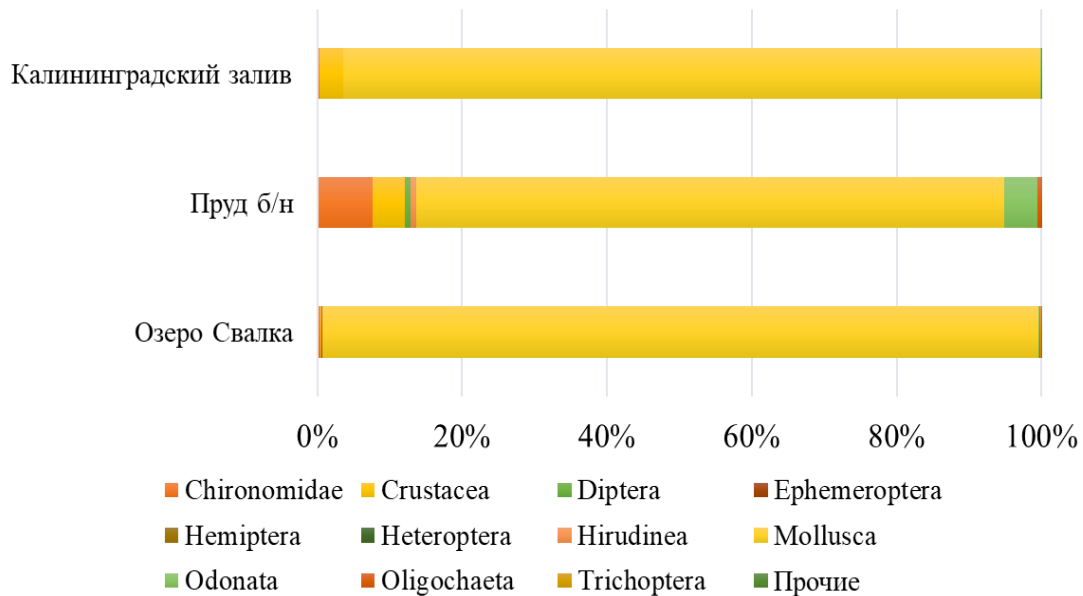


Рис. 7. Структура зообентосного сообщества по биомассе, %
Fig. 7. Structure of the zoobenthos community by biomass, %

Распределение численности и биомассы в исследуемых водных объектах получилось практически равным. В оз. Свалка наибольшую численность состав-

ляло семейство *Chironomidae*, в пруду без названия – семейство *Chironomidae* и класс *Crustacea*, в Калининградском заливе – класс *Crustacea*.

Во всех исследуемых водных объектах наибольшая биомасса наблюдалась у типа *Mollusca*.

Значения индекса сапробности Пантле-Букка для зообентоса во всех исследуемых водоемах в указанный период изменялись в диапазоне 1,2–3,19.

В оз. Свалка среднее значение индекса сапробности Пантле-Букка составляло 2,02, в пруду без названия – 2,23, в Калининградском заливе – 1,94.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследований влияния полигонов и свалок ТКО на водные экосистемы достаточно много [12–16], но большинство из них ограничивается исследованием гидрохимических показателей поверхностных или подземных вод, при этом гидрохимические показатели водных объектов подвержены частой изменчивости.

Проведенное исследование позволило расширить возможности мониторинга влияния фильтрата полигона ТКО на водные экосистемы.

Концепция экологического мониторинга влияния полигона ТКО на ближайшие водные экосистемы состоит в комплексном обследовании водных экосистем по гидрохимическим, гидробиологическим, ихтиологическим, гидрофизическим и гидрологическим показателям как на фоновых водных объектах, так и на объектах, находящихся под техногенным воздействием в зоне влияния полигона ТКО.

В составе зоопланктонного сообщества исследуемых водных объектов было обнаружено: оз. Свалка – 38 видов, пруд без названия – 44 вида и Калининградский залив – 32 вида.

Наибольшую численность и биомассу зоопланктона почти во всех исследуемых водных объектах составлял подкласс *Copepoda*, лишь в оз. Свалка наибольшая биомасса отмечалась у надотряда *Cladocera*.

Значение индекса сапробности Пантле-Букка для зоопланктона во всех исследуемых водоемах изменялось в диапазоне 1,24–2,25, что позволяет отнести их к олиго-β-мезосапробной зоне.

В составе зообентосного сообщества исследуемых водных объектов было обнаружено: оз. Свалка – 89 видов, пруд без названия – 45 видов и Калининградский залив – 31 вид.

Наибольшую численность зообентоса в оз. Свалка и пруду без названия представляло семейство *Chironomidae*, в Калининградском заливе – тип *Mollusca*.

Максимальная биомасса зообентоса во всех исследуемых водных объектах была представлена типом *Mollusca*.

Значение индекса сапробности Пантле-Букка для зообентоса во всех исследуемых водоемах находилось в диапазоне 1,2–3,19, что указывает на изменение от олигосапробной зоны до α-мезосапробной. При этом в случае расчета значения индекса сапробности Пантле-Букка для зообентоса Калининградский залив оказался менее загрязненным, чем расположенный рядом пруд без названия, который предположительно является «буфером» между полигоном ТКО и заливом (рис. 8). В случае расчета значения индекса сапробности Пантле-Букка для зоопланктона ситуация обратная, пруд оказался наименее загрязненным, чем другие водные объекты.

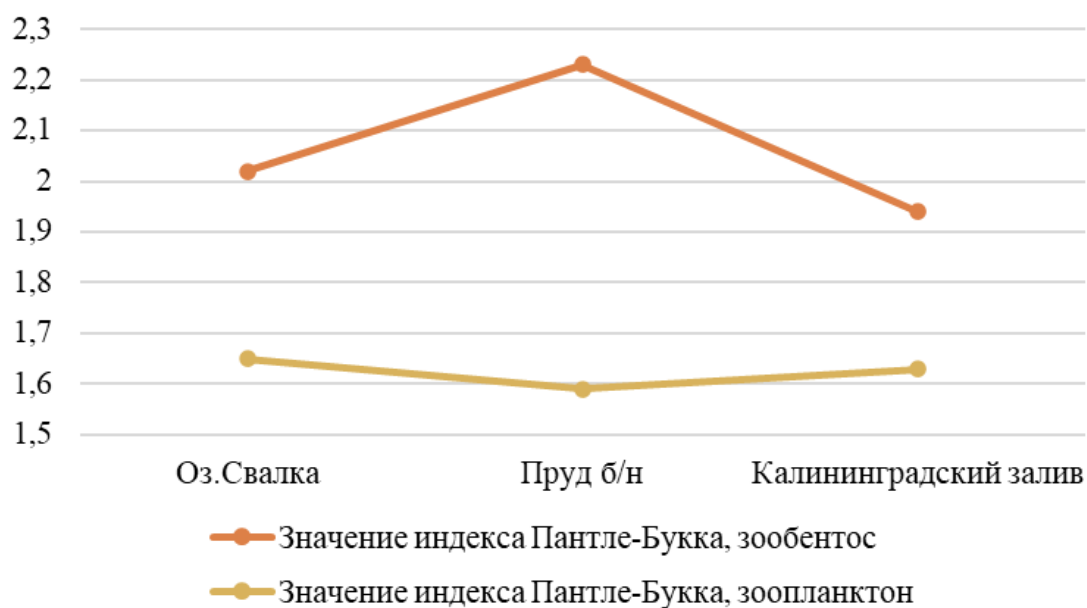


Рис. 8. Значение индекса Пантле-Букка в исследуемых водных объектах
Fig. 8. Value of the Pantle-Bucca index in the studied water bodies

По нашим предположениям, такая разница в значениях индекса в исследуемых водных объектах может быть связана с наибольшим видовым разнообразием зообентоса, чем зоопланктона, и, соответственно, большим количеством видов-индикаторов. Таким образом, в части расчетов различных гидробиологических индексов зообентос будет более показательным, чем зоопланктон.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги, можно сделать вывод, что в исследуемых водных объектах, предположительно подвергавшихся техногенному воздействию фильтрата полигона ТКО, наблюдается состояние водных экосистем, при котором сохраняются высокое видовое разнообразие и биомасса зоопланктона и зообентоса. Воды обследованных объектов, согласно методике Пантле-Букка, по содержанию зоопланктона и зообентоса можно идентифицировать как «умеренно загрязненные».

В дальнейшей перспективе данной работы планируется расширить перечень применяемых гидробиологических индексов для оценки состояния и загрязненности водных экосистем фильтратом полигона ТКО с более подробным анализом структуры зоопланктона и зообентоса.

Список источников

1. Галицкая, И. В. Аммонийный азот в фильтрате полигонов ТКО: образование, трансформация, долгосрочность загрязнения / И. В. Галицкая, В. С. Путилина, Т. И. Юганова. – DOI 10.31857/S0869780921010021 // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2021. – № 1. – С. 3–13.
2. Сметанин, В. И. Оценка негативного воздействия отработанных несанкционированных стихийных свалок и «полигонов» ТКО на окружающую среду / В. И. Сметанин. – DOI 10.26897/1997-6011-2025-2-68-76 // Природообустройство. – 2025. – № 2. – С. 68–76.
3. Минашкина, А. В. Разработка программы мониторинга водных объектов вблизи рекультивированного полигона ТКО в пос. им. А. Космодемьянского Калининградской области / А. В. Минашкина, С. В. Кондратенко, Е. А. Воробьева. – DOI 10.33933/2074-2762-2021-62-96-112 // Гидрометеорология и экология. – 2021. – № 62. – С. 96–112.
4. Галицкая, И. В. Оценка состояния полигона ТКО для обоснования мониторинговых исследований в пострекультивационный период / И. В. Галицкая, В. С. Путилина, И. А. Костикова. – DOI 10.31857/S0869780922050034 // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2022. – № 5. – С. 49–60.
5. Евграфов, А. В. Оценка состояния водных экосистем в зоне влияния четырех закрытых полигонов ТКО / А. В. Евграфов, Н. С. Косов, Н. В. Лагутина. – DOI 10.26897/2949-4710-2024-2-2-16-29 // Тимирязевский биологический журнал. – 2024. – № 2. – С. 16–29.
6. Structural Organization of Zooplankton Communities in Different Types of River Mouth Areas / V. Zhikharev, D. Gavrillo, I. Kudrin [et al.]. – DOI: 10.3390/d15020199 // Diversity. – 2023. – № 15. – P. 1–16.
7. Koveshnikov, M. Structure of Zoobenthos at Different Stages of Ecosystem Succession in Thermokarst Water Bodies of the Central Yamal Peninsula / M. Koveshnikov, E. Krylova. – DOI: 10.1134/S1995082922050157 // Inland Water Biology. – 2022. – № 15. – P. 603–612.
8. Кутикова, Л. А. Определитель пресноводных беспозвоночных Европейской части СССР / Л. А. Кутикова. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1977. – 511 с.
9. Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России: в 2 т / под ред. В. Р. Алексеева, С. Я. Цалолихина. – Москва: Т-во научных изданий КМК, 2010. – Т. 1. – 495 с. – ISBN: 978-5-87317-684-7.
10. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий: в 6 т / под ред. С. Я. Цалолихина. – СПб.: Наука, 1995. – Т. 2. – 627 с.
11. Косов, Н. С. Исследование планктона и бентоса при выполнении инженерно-экологических изысканий на р. Лихоборке в районе полигона твердых бытовых отходов «Долгопрудный» / Н. С. Косов, А. В. Евграфов // Инженерные изыскания в строительстве: материалы VI Общерос. науч.-практ. конф. молодых специалистов (Москва, 25 апреля 2024 г.) / ООО «Институт геотехники и инженерных изысканий в строительстве». – Москва: ООО «Геомаркетинг», 2024. – С. 71–77.
12. Сытник, Н. А. Оценка влияния на водные объекты рекультивации полигона твердых коммунальных отходов города Керчь Республики Крым /

Н. А. Сытник. – DOI: 10.58551/20728158_2023_10_59 // Вода: химия и экология. – 2023. – № 10. – С. 59–65.

13. Хазипова, В. В. Оценка техногенного воздействия на качество поверхностных вод реки Кальмиус в районе полигона промышленных отходов / В. В. Хазипова, Ю. В. Мнускина, А. В. Скочко // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. – 2020. – № 3 (7). – С. 500–504.

14. Понамарев, Ю. Ю. Мониторинг состояния поверхностных и подземных вод в районе размещения полигона твердых бытовых отходов, расположенного в поселке Ларино / Ю. Ю. Понамарев, В. В. Хазипова, М. Б. Старостенко // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. – 2019. – № 1 (2). – С. 227–233.

15. О воздействии полигонов ТБО на поверхностные и подземные природные воды / С. С. Воронич, Н. Н. Роева, Д. А. Зайцев [и др.]. // Экологические системы и приборы. – 2017. – № 5. – С. 16–24.

16. Шарова, О. А. Экологический гидрогеологический мониторинг полигона твердых бытовых отходов / О. А. Шарова, Л. Ф. Ушивцева // Астраханский вестник экологического образования. – 2018. – № 2 (44). – С. 118–125.

References

1. Galitskaya, I. V. Ammonium nitrogen in the filtrate of MSW landfills: formation, transformation, durability of pollution / I. V. Galitskaya, V. S. Putilina, N. I. Yuganova // Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology. – 2021. – № 1. – P. 3–13.

2. Smetanin, V. I. Assessment of the negative impact of spent unauthorized spontaneous landfills and MSW "landfills" on the environment / V. I. Smetanin // Environmental management. – 2025. – № 2. – P. 68–76.

3. Minashkina, A. V. Development of a program for monitoring water bodies near the reclaimed MSW landfill in the village of A. Kosmodemyansky, Kaliningrad region / A. V. Minashkina, S. V. Kondratenko, E. A. Vorobyova // Hydrometeorology and Ecology. – 2021. – № 62. – P. 96–112.

4. Galitskaya, I. V. Assessment of the MSW landfill condition to substantiate monitoring studies in the post-rehabilitation period / I. V. Galitskaya, V. S. Putilina, I. A. Kostikova // Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology. – 2022. – № 5. – P. 49–60.

5. Evgrafov, A. V. Assessment of the state of aquatic ecosystems in the zone of influence of four closed MSW landfills / A. V. Evgrafov, N. S. Kosov, N. V. Lagutina // Timiryazevsky Biological Journal. – 2024. – № 2. – P. 16–29.

6. Structural Organization of Zooplankton Communities in Different Types of River Mouth Areas / V. Zhikharev, D. Gavrilko, I. Kudrin [et al.] // Diversity. – 2023. – № 15. – P. 1–16.

7. Koveshnikov, M. Structure of Zoobenthos at Different Stages of Ecosystem Succession in Thermokarst Water Bodies of the Central Yamal Peninsula / M. Koveshnikov, E. Krylova // Inland Water Biology. – 2022. – № 15. – P. 603–612.

8. Kutikova, L. A. Determinant of freshwater invertebrates of the European part of the USSR / L. A. Kutikova. – Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977. – 511 p.

9. Determinant of zooplankton and zoobenthos in fresh waters of European Russia: in 2 volumes / edited by V. R. Alekseev, S. Ya. Tsalolikhin. – Moscow: Collection of scientific publications of the KMC, 2010. – Vol. 1. – 495 p.
10. Determinant of freshwater invertebrates of Russia and adjacent territories: in 6 volumes / edited by S. Ya. Tsalolikhin. – Saint-Petersburg: Nauka Publ., 1995. – Vol. 2. – 627 p.
11. Kosov, N. S. Investigation of plankton and benthos during engineering and environmental surveys on the Likhoborka River in the area of the Dolgoprudny solid waste landfill / N. S. Kosov, A. V. Evgrafov // Engineering surveys in construction: proceedings of the VI All-Rus. scientif. and pract. conf. of young specialists (Moscow, April 25, 2024) / Institute of Geotechnics and Engineering Surveys in Construction, LLC. – Moscow: Geomarketing LLC, 2024. – P. 71–77.
12. Sytnik, N. A. Assessment of the impact on water bodies of the reclamation of the municipal solid waste landfill in Kerch, Republic of Crimea / N. A. Sytnik // Water: chemistry and ecology. – 2023. – № 10. – P. 59–65.
13. Khazipova, V. V. Assessment of the anthropogenic impact on the quality of the surface waters of the Kalmius River in the area of the industrial waste landfill / V. V. Khazipova, Yu. V. Mnuskina, A. V. Skochko // Fire and technosphere safety: problems and ways of improvement. – 2020. – № 3 (7). – P. 500–504.
14. Ponamarev, Yu. Y. Monitoring of the state of surface and groundwater in the area of the municipal solid waste landfill located in the village of Larino / Yu. Y. Ponamarev, V. V. Khazipova, M. B. Starostenko // Fire and technosphere safety: problems and ways of improvement. – 2019. – № 1 (2). – P. 227–233.
15. On the impact of landfills on surface and underground natural waters / S. S. Voronich, N. N. Roeva, D. A. Zaitsev [et al.] // Ecological systems and devices. – 2017. – № 5. – P. 16–24.
16. Sharova, O. A. Ecological hydrogeological monitoring of a solid household waste landfill / O. A. Sharova, L. F. Ushvtseva // Astrakhan Bulletin of Environmental Education. – 2018. – № 2 (44). – P. 118–125.

Информация об авторах

А. В. Василискова – заведующая лабораториями кафедры водных биоресурсов и аквакультуры

С. В. Кондратенко – кандидат биологических наук, доцент кафедры водных биоресурсов и аквакультуры

Information about the authors

A. V. Vasiliskova – Head of Laboratories of the Department of Water Bioresources and Aquaculture

S. V. Kondratenko – Candidate of Biological sciences, Associate Professor of the Department of Water Bioresources and Aquaculture

Вклад авторов

А. В. Василюкова – идея, сбор материала, обработка материала и написание статьи

С. В. Кондратенко – научное редактирование текста и научное руководство

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

A. V. Vasiliskova – idea, collection of material, processing of material, and writing of the article

S. V. Kondratenko – scientific editing of the text and scientific supervision

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 01.09.2025; одобрена после рецензирования 09.09.2025; принята к публикации 20.09.2025.

The article was submitted 01.09.2025; approved after reviewing 09.09.2025; accepted for publication 20.09.2025.

Научная статья

УДК 597.553.2

DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-26-38

Результаты мониторинга нерестовой части популяции сига обыкновенного (*Coregonus lavaretus* L.) в нижнем течении р. Печоры в 2024 г.

Эдвард Александрович Генрих¹✉, Алексей Викторович Боровской², Сергей Викторович Пастухов³, Алексей Михайлович Торцев⁴, Надежда Сергеевна Владыкина⁵

^{1,2,3,4,5} Северный филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Архангельск, Россия

¹ genrih@severniro.vniro.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9085-4365>

² borovskoy@severniro.vniro.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8868-734X>

³ pastuhov@severniro.vniro.ru, <https://orcid.org/0009-0007-8359-9387>

⁴ torzevalex@severniro.vniro.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2329-0042>

⁵ vladykina@severniro.vniro.ru, <https://orcid.org/0009-0006-3606-1747>

Аннотация. Река Печора – одна из крупнейших рек Европейской части России, играет важную роль в поддержании биоразнообразия ихтиофауны. Проявляя высокую чувствительность к качеству условий среды обитания, сиговые виды рыб подвержены сильному отрицательному воздействию при увеличении антропогенной нагрузки на водные экосистемы со стороны ресурсодобывающей промышленности, а также селективного отлова при осуществлении рыболовства. Целью данного исследования была оценка нерестовой части популяции сига обыкновенного (*Coregonus lavaretus* L.) в низовьях р. Печоры в осенний период 2024 г. с анализом влияния некоторых абиотических факторов на его воспроизводство. Проведен анализ биологических параметров 106 особей сига, включая размерно-возрастную структуру, половой состав и стадии зрелости гонад. В уловах установлено преобладание самцов (67 %) над самками (33 %), а также доминирование особей возрастом 5+ – 6+ лет (78,2 %). Высокие температуры воды (до 12,2 °C в сентябре) являются фактором, оказывающим влияние на сроки нереста, о чем свидетельствует преобладание рыб с III стадией зрелости гонад (53 %), тем не менее корреляционный анализ не выявил значимой связи между температурой воды и показателями уловов ($R^2 = 0,04$). Уловы на усилие в 2024 г. составили 0,88 экз./сплавку, что ниже среднего показателя за последние 3 года (2,07 экз./сплавку), однако значение улова на усилие, выраженное в кг на сплавку, остается стабильным (0,46 кг/сплавку) и держится на уровне среднесноголетнего значения – 0,45 кг/сплавку. Полученные данные подтверждают необходимость дальнейшего мониторинга для оценки состояния популяции сига обыкновенного в условиях антропогенного воздействия.

Ключевые слова: сиг обыкновенный, р. Печора, нерестовый ход, мониторинг, биология, улов на усилие.

© Генрих Э. А., Боровской А. В., Пастухов С. В., Торцев А. М., Владыкина Н. С., 2025

Для цитирования: Генрих Э. А., Боровской А. В., Пастухов С. В., Торцев А. М., Владыкина Н. С. Результаты мониторинга нерестовой части популяции сига обыкновенного (*Coregonus lavaretus* L.) в нижнем течении р. Печоры в 2024 г. // Известия КГТУ. 2025. № 79. С. 26-38. DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-26-38.

Original article

Monitoring results of the spawning part of the whitefish (*Coregonus lavaretus* L.) population in the lower reaches of the Pechora River in 2024

Edvard A. Genrikh¹, Aleksey V. Borovskoy², Sergey V. Pastukhov³, Aleksey M. Tortsev⁴, Nadezhda S. Vladykina⁵

^{1,2,3,4,5} Northern branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and oceanography, Arkhangelsk, Russia

¹ genrih@severniro.vniro.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-9085-4365>

² borovskoy@severniro.vniro.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8868-734X>

³ torzevalex@severniro.vniro.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2329-0042>

⁴ pastuhov@severniro.vniro.ru, <https://orcid.org/0009-0007-8359-9387>

⁵ vladykina@severniro.vniro.ru, <https://orcid.org/0009-0006-3606-1747>

Abstract. The Pechora River is one of the largest rivers in the European part of Russia. It plays an important role in maintaining ichthyofauna biodiversity. Being highly sensitive to the quality of habitat conditions, whitefish species are subject to severe negative effects with an increase in anthropogenic pressure on aquatic ecosystems from the resource industry, as well as selective trapping during fishing. The purpose of this study is to assess the spawning part of the whitefish (*Coregonus lavaretus* L.) population in the lower reaches of the Pechora River in the autumn of 2024 with an analysis of the influence of some abiotic factors on its reproduction. The biological parameters of 106 whitefish individuals have been analyzed, including the size and age structure, sexual composition, and stages of gonad maturity. In catches, the predominance of males (67%) over females (33%) has been established, as well as the dominance of individuals by age 5+ – 6+ years (78,2%). High water temperatures (up to 12,2 °C in September) are a factor affecting spawning time, as evidenced by the predominance of fish with stage III gonad maturity (53%). However, correlation analysis has not revealed a significant relationship between water temperature and catch rates ($R^2 = 0,04$). Catches per effort in 2024 amounted to 0,88 specimens/alloy, which is lower than the average for the last 3 years (2,07 specimens/alloy), however, the catch per effort, expressed in kg per alloy, remains stable (0,46 kg/alloy) and remains at the level of the average annual value of 0,45 kg/alloy. The data obtained confirms the need for further monitoring to assess the state of the whitefish population under anthropogenic influence.

Keywords: whitefish, the Pechora River, spawning course, monitoring, biology, catch on effort.

For citation: Genrikh E. A., Borovskoy A. V., Pastukhov S. V., Tortsev A. M., Vladykina N. S. Monitoring results of the spawning part of the whitefish (*Coregonus lavaretus* L.) population in the lower reaches of the Pechora River in 2024. *Izvestiya*

KGTU = KSTU News. 2025;(79):26-38. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-26-38.

ВВЕДЕНИЕ

Река Печора – одна из крупнейших рек Европейской части России, протекающая по территории Республики Коми и Ненецкого автономного округа. Ее длина составляет 1809 км, а площадь водосборного бассейна – 322 тыс. км² [1]. Бассейн р. Печоры является важной средой обитания для многих видов рыб, включая ценные промысловые виды, а также играет ключевую роль в воспроизводстве рыбных ресурсов [2–10].

Сиговые виды рыб – ценный объект промысла на территории Республики Коми и Ненецкого автономного округа [2–4]. Проявляя высокую чувствительность к качеству условий среды обитания, они подвержены сильному отрицательному воздействию при увеличении антропогенной нагрузки на водные экосистемы со стороны ресурсодобывающей промышленности [11]. Также важным фактором, оказывающим влияние на состояние популяций сиговых, является их добыча.

Развитие нефтегазодобывающей промышленности в Печорском регионе привело к формированию развитой инфраструктуры, обеспечивающей добычу и транспортировку углеводородного сырья. В результате экосистемы Печорского бассейна испытывают серьезное антропогенное воздействие из-за большого количества аварий, связанных с добычей и транспортировкой нефти и приводящих к повышению содержания поллютантов в водной среде [12–14].

Последствия аварий в конечном счете сказываются на экосистеме реки, что делает мониторинг и изучение рыбных сообществ р. Печоры важной задачей для сохранения ее биоресурсов.

В связи с вышеизложенным цель работы заключалась в проведении мониторинга нерестовой части популяции сига обыкновенного (*Coregonus lavaretus* L.) в низовьях р. Печоры и анализе полученных результатов.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились в период с 07.09.2024 по 17.10.2024 на рыболовном участке «Зыковская», расположенном в низовьях р. Печоры, в 442 км от устья (рис. 1). Протяженность тони составляет 1,5 км, максимальная глубина – 4 м. Лов рыбы осуществлялся плавными двустенными жаберными сетями длиной 150–240 м, высотой 3 м, с ячеей 40 мм, сбор материала – из промысловых уловов. Собранные за каждый выезд на рыболовный участок уловы сортировались со всех заметов плавной сетью (сплавов) отдельно. Проведена оценка ННН-промысла посредством опросов рыбаков. Всего на биологический анализ было взято 106 экз. сига.

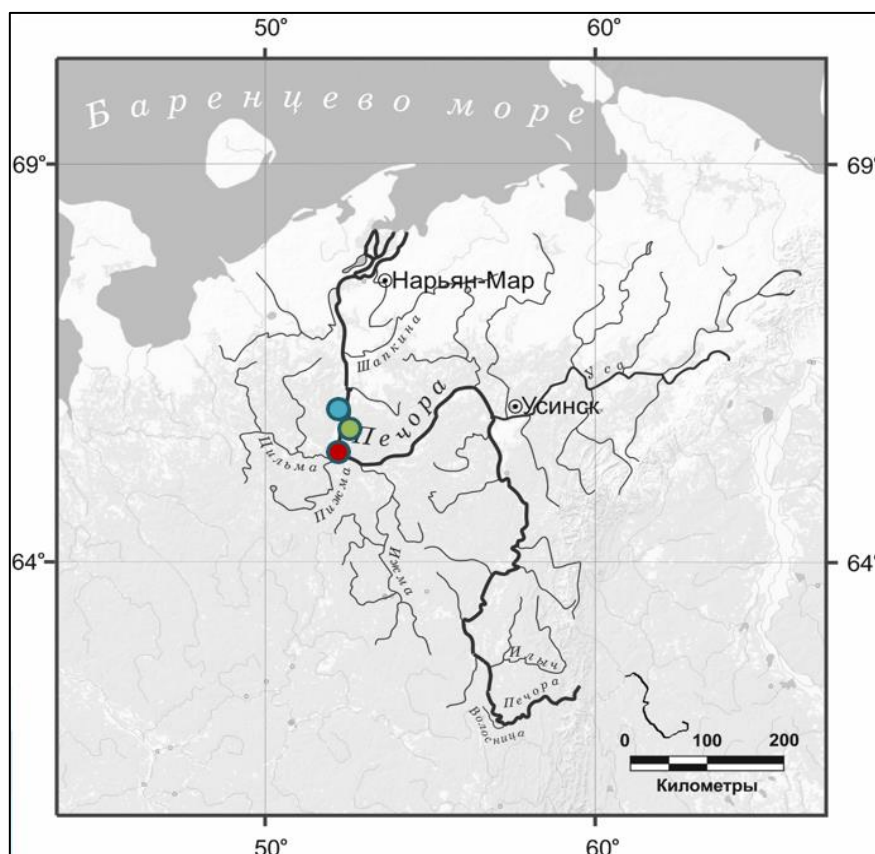


Рис. 1. Карта-схема бассейна р. Печоры, красным кругом отмечен район работ в 2024 г., зеленым – в 2023 г., синим – в 2022 г.

Fig. 1. A schematic map of the Pechora River basin, with a red circle marking the area of works carried out in 2024, green – in 2023, and blue – in 2022

Биологический анализ проводили по общепринятым методикам [15–16]. Определяли абсолютную длину по Смитту (АС), массу и пол, возраст рыб – по чешуе согласно методическим указаниями И. Ф. Правдина [17]. Стадии зрелости гонад определяли по шкале П. А. Дрягина [18]. Температуру воды измеряли с помощью водного термометра. Статистическую обработку материала проводили при помощи программного комплекса Microsoft Excel по стандартным методикам [19].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основные биологические характеристики сига обыкновенного, выловленного в низовьях р. Печоры, представлены в табл. 1–2.

Масса рыб изменялась в пределах от 227 до 1080 г и в среднем составляла 460,3 г. Высокие значения ошибки средней для возрастной группы 5+ объясняются малой выборкой самок сига (5 экз.) по сравнению с самцами (27 экз.).

Таблица 1. Весовые показатели сига обыкновенного по возрастным группам из р. Печоры, 2024 г.

Table. 1. Weight indicators for whitefish by age group from the Pechora River, 2024

Возраст, лет	Пол			Исследовано рыб, экз.
	♀	♂	♀+♂	
Вес, г				
5+	<u>369,4±42,5</u> 227–490	<u>384,6±9,7</u> 316–550	<u>382,3±10,2</u> 227–550	32
6+	<u>488,2±17,7</u> 371–660	<u>422,1±10,5</u> 291–580	<u>446,7±10,3</u> 291–660	51
7+	<u>630,0±37,9</u> 371–660	<u>533,1±26,4</u> 291–580	<u>553,9±24,3</u> 396–700	14
8+	<u>703,0±41,8</u> 605–820	<u>475,3±31,6</u> 407–530	<u>617,6±50,0</u> 407–820	8
10+	1080	–	1080	1
Итого			<u>460,3±11,7</u> 227–1080	106

Примечание: в таблице и далее по тексту в числителе приведено среднее значение параметра с основной ошибкой, в знаменателе – минимальные и максимальные значения

Выборка сига была представлена особями со средними линейными показателями (АС) 33,9 см, при колебаниях крайних значений от 28,0 до 43,2 см. (табл. 2). Средняя длина одновозрастных самок и самцов не имела существенных различий.

Таблица 2. Средние длины (АС) сига обыкновенного по возрастным группам из р. Печоры, 2024 г.

Table. 2. Average lengths (AC) of whitefish by age group from the Pechora River in 2024

Возраст, лет	Пол			Исследовано рыб, экз.
	♀	♂	♀+♂	
Длина (АС), см				
5+	<u>30,7±1,0</u> 28,0–32,8	<u>32,2±0,2</u> 30,0–35,2	<u>31,9±0,2</u> 28,0–35,2	32
6+	<u>34,3±0,4</u> 31,0–37,0	<u>33,3±0,3</u> 29,0–37,0	<u>33,7±0,2</u> 29,0–37,0	51
7+	<u>38,1±0,2</u> 37,7–38,5	<u>35,9±0,6</u> 32,0–38,2	<u>36,4±0,5</u> 32,0–38,5	14
8+	<u>38,1±0,4</u> 37,0–39,3	<u>35,3±0,9</u> 34,0–37,0	<u>37,1±0,6</u> 34,0–39,3	8
10+	43,2	—	43,2	1
Итого			<u>33,9±0,2</u> 28-43,2	106

В половой структуре улова заметно преобладание самцов (67 %) над самками (33 %). Нерест сига проходит во второй половине октября и зависит от гидрологических условий водного объекта.

Для вымета половых продуктов температура воды должна быть ниже 4–6 °С. В период проведения работ отмечались высокие температурные показатели воздуха (в сентябре 15,8 °С, в октябре 2,5 °С) и воды, принимающие значения в сентябре 12,2 °С, в октябре – 2,5 °С. Кроме того, уровень воды во время проведения работ был ниже средних многолетних значений в указанный период и отмечался на уровне летней межени.

В период проведения исследований большинство особей сига имело III стадию зрелости гонад (59,0 %), несколько меньше доля рыб с IV стадией (17,0 %), V стадия встречалась у 18,0 % просмотренных особей (рис. 2).

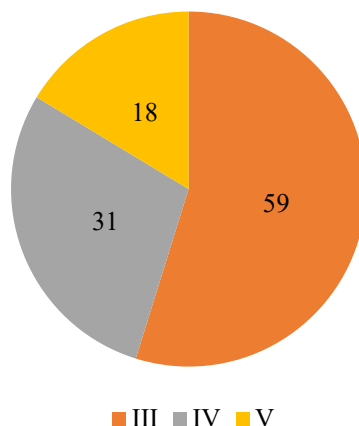


Рис. 2. Репродуктивная структура сига обыкновенного в р. Печоре в 2024 г., %
Fig. 2. Stages of maturity of whitefish in the Pechora River in 2024, %

В промысловых уловах сиг был представлен особями в возрасте 5+ – 10+ лет (рис. 3). Наибольшую долю в уловах занимали особи в возрасте 6+ (48,1 %) и 5+ лет (30,1 %). Доля старших возрастных групп составляла всего 8,4 % (8+ – 10+ лет).

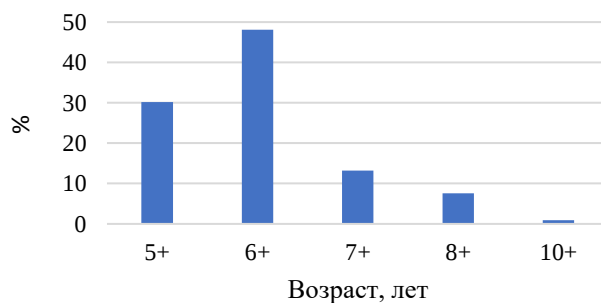


Рис. 3. Возрастная структура нерестового стада сига в р. Печоре в 2024 г.
Fig. 3. Age structure of the spawning stock of whitefish in the Pechora River in 2024

Известно, что половая зрелость печорского сига наступает на 4–6 году жизни [16]. Как можно заметить (рис. 4), в период нерестового хода у самок сига преобладала IV стадия зрелости вплоть до конца сентября, затем в контрольных уловах наблюдались особи с V стадией зрелости половых продуктов. Следует

отметить, что рассматриваемая выборка характеризуется двукратным преобладанием самцов над самками.

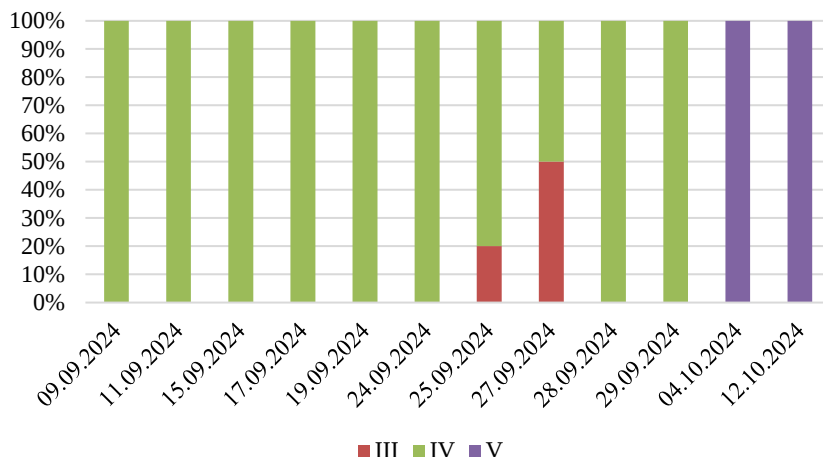


Рис. 4. Динамика репродуктивной структуры самок сига
Fig. 4. Dynamics of the reproductive structure of whitefish females

Самцы сига обыкновенного в большинстве случаев имели III стадию развития гонад. В первой декаде октября в контрольные орудия лова попадались особи с IV–V стадией развития половых продуктов (рис. 5). По мнению авторов, более ранние сроки полового созревания самцов сига, наступающего в возрасте 4+, обуславливают их преобладание в анализируемой выборке.

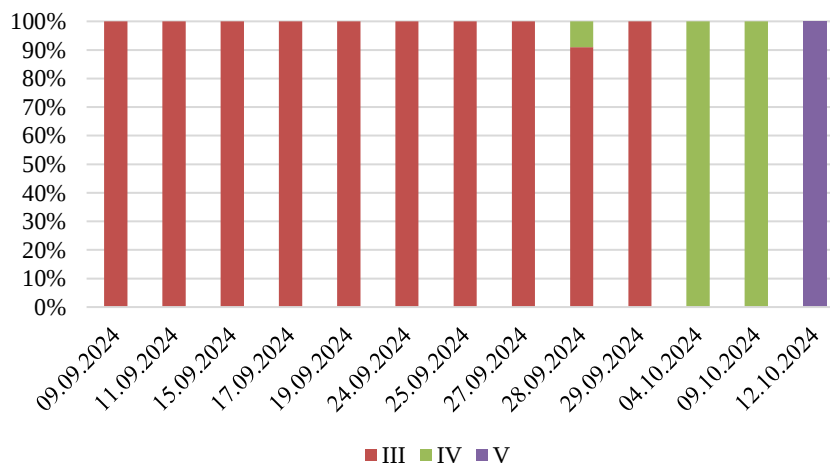


Рис. 5. Динамика репродуктивной структуры самцов сига
Fig. 5. Dynamics of the reproductive structure of whitefish males

Поскольку температура воды – это один из основных факторов, определяющих сроки нереста рыб [16], нами был проведен корреляционный анализ между температурой водной поверхности и количеством пойманной рыбы за один замет плавной сетью в период мониторинга на р. Печоре. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена составил 0,22, коэффициент парной линейной корреляции Пирсона – 0,2. Согласно шкале Чеддока [20] корреляционная связь между температу-

рой воды и величиной уловов сига обыкновенного находится на низком уровне. Коэффициент детерминации составил 0,04 (4 %), что также говорит об отсутствии функциональной зависимости между температурой воды и показателями уловов сига.

Уловы на единицу промыслового усилия показывают плотность пространственного распределения водных биоресурсов в водном объекте и служат индексом численности запаса [21]. В период мониторинга в низовьях р. Печоры всего была произведена 181 сплавка плавной сетью с ячеей 40 мм. Уловы сига на 1 сплавку плавной сетью с ячеей 40 мм составили 0,88 экземпляра, или 0,46 кг. Средняя масса особей сига, выловленная плавной сетью ячеей 40 мм, составила 0,488 кг.

В результате опросов рыбаков-любителей установлено, что на реке Печоре в Ижемском районе Республики Коми интенсивно ведется лов сига. В месте проведения мониторинга на участок акватории р. Печоры протяженностью 20 км постоянно выезжают примерно 20 лодок, из которых лишь на 6-ти лов ведется официально. С приближением к относительно крупным прибрежным населенным пунктам увеличивается количество рыбаков, которые ведут лов сига осенью.

В ходе ретроспективного анализа фондовых данных Северного филиала ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» по уловам на усилие с использованием плавных сетей с ячеей 40 мм в низовьях р. Печоры можно отметить, что пик данного показателя пришелся на 2023 г. (4,63 экз./сплавку), значение улова на усилие в 2024 г. (0,88 экз./сплавку) оказалось несколько выше в сравнении с 2022 г. (0,69 экз./сплавку) (рис. 6). В то же время уловы на усилие, выраженные в кг на 1 сплавку, за последние три года значительно не изменяются и в среднем составляют 0,45 кг/сплавку. Таким образом, очевидно, что в 2023 г. вылавливался сиг небольшой навески младших возрастных классов.

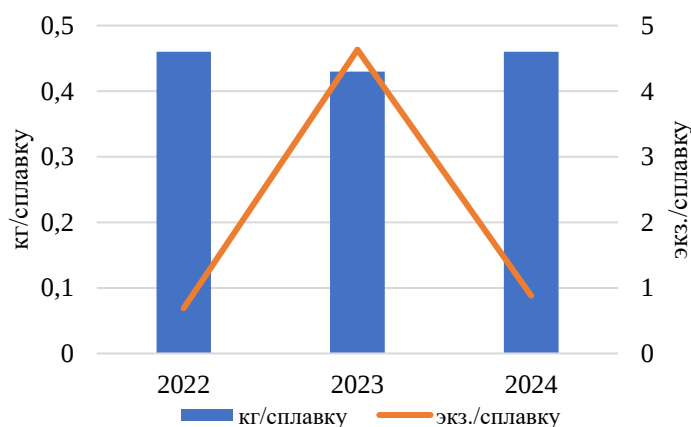


Рис. 6. Динамика улова на усилие сига из р. Печоры с 2022 по 2024 гг.
Fig. 6. Catch dynamics for whitefish from the Pechora River from 2022 to 2024

Динамика уловов на усилие сига во временном аспекте в ходе мониторинга на рыболовном участке «Зыковская» р. Печоры представлена на рис. 7. Можно заметить, что пик уловов приходился на первую декаду октября 2024 г., что свидетельствует о наиболее благоприятных условиях для нереста сига в этот период, а также о высокой активности рыбы в преддверии зимнего сезона.

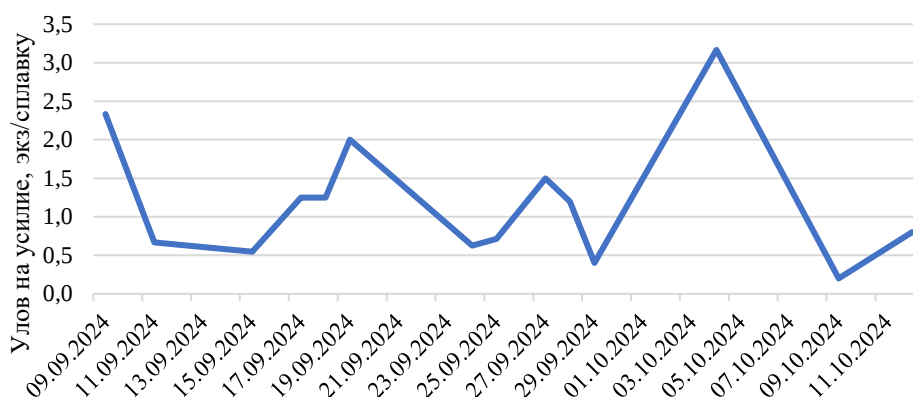


Рис. 7. Динамика улова на усилие в ходе нерестового хода сига р. Печоры в 2024 г.

Fig. 7. Dynamics of catch per effort during whitefish spawning on the Pechora River in 2024

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный мониторинг нерестовой части популяции сига обыкновенного (*C. lavaretus*) в низовьях р. Печоры в осенний период 2024 г. позволил выявить ряд важных биологических и экологических закономерностей. В улове преобладали самцы (67 %) над самками (33 %). Основу уловов составили особи возрастом 5+ – 6+ лет (78,2 %), что соответствует известным данным о наступлении половой зрелости у печорского сига.

Отмечено влияние аномально высокой температуры воды на нерестовую миграцию сига: значительная часть особей (59 %) находилась на III стадии зрелости гонад, что может быть связано с изменением типичных сроков нереста и их смещением на более поздний срок вплоть до конца октября. Корреляционный анализ не выявил значимой связи между температурой воды и количественными показателями уловов (коэффициент детерминации $R^2 = 0,04$), что может указывать на влияние иных факторов, таких как гидрологический режим или антропогенное воздействие.

Сравнение динамики уловов на усилие с историческими данными показало снижение показателя в 2024 г. (0,88 экз./сплавку против среднего значения 2,07 экз./сплавку за последние 3 года), в то же время значение улова на усилие, выраженное в кг на сплавку, в 2024 г. составило 0,46 кг/сплавку и держится на уровне среднееголетнего значения (2022–2024 гг.) – 0,45 кг/сплавку. Для более глубокого изучения состояния нерестовой части сига и динамики нерестовой миграции необходимо продолжить мониторинг и ихтиологические исследования в низовьях р. Печоры, испытывающей существенное антропогенное воздействие, для разработки эффективных мер охраны и рационального использования биоресурсов р. Печоры.

Список источников

1. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. – Т. 3. Северный край / под ред. Н. М. Жила. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1965. – 612 с.
2. Боровской, А. В. Пищевые отношения сиговых видов рыб в нижнем течении реки Уса в осенний период / А. В. Боровской, А. П. Новоселов // Труды КарНЦ РАН. – 2020. – № 5. – С. 44–58.
3. Боровской, А. В. Биологическая характеристика нерестовых стад сиговых рыб реки Усы Печорского бассейна (по материалам сборов 2008 г.) / А. В. Боровской, А. П. Новоселов // Биология, биотехника разведения и состояние запасов сиговых рыб: материалы седьмого международного научно-производственного совещания (Тюмень, 16–18 февраля 2010 г). Под общей редакцией А. И. Литвиненко, Ю. С. Решетникова. – Тюмень: Государственный научно-производственный центр рыбного хозяйства, 2010. – С. 87–92.
4. Боровской, А. В. Современное состояние сиговых рыб в бассейне р. Печора / А. В. Боровской, А. П. Новоселов // Перспективы рыболовства и аквакультуры в современном мире: материалы III научной школы молодых ученых и специалистов по рыбному хозяйству и экологии, посвященной 140-летию со дня рождения К. М. Дерюгина (Звенигород, 15–21 апреля 2018 г). Под редакцией А. М. Орлова, И. И. Гордеева, А. А. Сергеева. – Звенигород: Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, 2018. – С. 64.
5. Бознак, Э. И. Популяционная структура сига *Coregonus lavaretus* (Salmonidae: Coregoninae) в озерно-речной системе Приполярного Урала / Э. И. Бознак, В. И. Пономарев // Вопросы ихтиологии. – 2023. – Т. 63, № 5. – С. 582–593.
6. Новоселов, А. П. Видовое и экологическое разнообразие ихтиофауны бассейна р. Печоры / А. П. Новоселов // Биология внутренних вод. – 2021. – № 3. – С. 261–270.
7. Сендек, Д. С. Генетическая дифференциация сиговых рыб в реке Печоре / Д. С. Сендек, А. П. Новоселов, Э. И. Бознак – DOI: 10.15372/SEJ20160203 // Сибирский экологический журнал. – 2016. – Т. 23, № 2. – С. 194–201.
8. Metal concentrations in fish tissues from Kara, Bolshoi Patok, and Maly Patok River basins, Northeastern European Russia / C. Hughson, V. I. Ponomarev, B. M. Kondratenok, T. R. Walker. – DOI: 10.1007/s44274-024-00058-w // Discov Environ 2, 27. – 2024. – P. 1–15.
9. Новоселов, А. П. Динамика современного состояния сиговых рыб в бассейне р. Печора / А. П. Новоселов, И. И. Студенов // Труды ВНИРО. – 2014. – Т. 151. – С. 141–150.
10. Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 23 октября 2019 г. № 596 «Об утверждении Перечня особо ценных и ценных видов водных биологических ресурсов».
11. Никольский, Г. В. Экология рыб / Г. В. Никольский. – Москва: Высшая школа, 1974. – 367 с.
12. Бознак, Э. И. Максимальный возраст обыкновенного сига в бассейне реки Печоры / Э. И. Бознак, В. И. Пономарев. – DOI: 10.25750/1995-4301-2024-4-187–193 // Теоретическая и прикладная экология. – 2025. – № 1. – С. 187–193.

13. Антонова, В. П. Оценка воздействия газонефтедобычи в шельфовой зоне Западной Арктики на проходных и полупроходных рыб Карского и Баренцева морей / В. П. Антонова, А. П. Новоселов, Н. А. Чуксина // Биологические ресурсы прибрежной Российской Арктики. – Москва: Изд-во ВНИРО, 2000. – С. 6–9.
14. Голузина, А. Д. Влияние аварий нефтегазового комплекса на содержание нефтепродуктов в поверхностных водах бассейна реки Печора / А. Д. Голузина // Проблемы и мониторинг природных экосистем: сборник статей X Всероссийской научно-практической конференции (Пенза, 30 октября 2023 г.). – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2023. – С. 32–36.
15. Методическое пособие по изучению питания и пищевых отношений рыб в естественных условиях / отв. ред. Е. В. Боруцкий. – Москва: Наука, 1974. – 254 с.
16. Решетников, Ю. С. Экология и систематика сиговых рыб / Ю. С. Решетников. – Москва: Наука, 1980. – 300 с.
17. Правдин, И. Ф. Руководство по изучению рыб / И. Ф. Правдин. – Москва: Пищевая промышленность, 1966. – 376 с.
18. Дрягин, П. А. Половые циклы и нерест рыб / П. А. Дрягин // Изв. ВНИОРХ, 1949. – Т. 28. – С. 3–113.
19. Ивантер, Э. В. Введение в количественную биологию: учеб. пособие для вузов / Э. В. Ивантер, А. В. Коросов. – Петрозаводск: Изд-во Петрозавод. гос. ун-та, 2003. – 304 с.
20. Chaddock, R. E. Principles and methods of statistics / R. E. Chaddock. – Boston, New York [etc.]: Houghton Mifflin, 1925. – 471 p.
21. Влияние горных разработок на популяцию кумжи р. Зимняя Золотица / И. И. Студенов, А. М. Торцев, Г. М. Устюжинский, Д. В. Чупов // Лососевые рыбы: биология, воспроизводство, промысел: материалы всероссийской научно-практической конференции (Мурманск, 23–24 марта 2023 г.). – Мурманск: Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, 2023. – С. 429–433.

References

1. Surface water resources of the USSR: Hydrological study. – Vol. 3. Northern Territory / edited by N. M. Zhila. – Leningrad: Gidrometeoizdat, 1965. – 612 p.
2. Borovskoy, A. V. Food relations of whitefish species in the lower reaches of the Usa River in the autumn period / A. V. Borovskoj, A. P. Novoselov // Proceedings of the KarSC RAS. – 2020. – № 5. – P. 44–58.
3. Borovskoy, A. V. Biological characteristics of spawning herds of whitefish of the Usy River of the Pechora basin (based on the materials of the 2008 collections) / A. V. Borovskoy, A. P. Novoselov // Biology, biotechnics of breeding and the state of whitefish stocks: Proceedings of the seventh international scientific and production meeting (Tyumen, 16–18 February 2010). Under the general jurisdiction of A. I. Litvinenko, Y. S. Reshetnikova. – Tyumen: State Scientific and Production Center of Fisheries, 2010. – P. 87–92.
4. Borovskoy, A. V. The current state of whitefish in the Pechora River basin / A. V. Borovskoy, A. P. Novoselov // Prospects of fishing and aquaculture in the modern world: materials of the III scientific school of young scientists and specialists in fisheries and ecology, dedicated to the 140th anniversary of the birth of K. M. Deryugina (Zvenigorod, 15–21 April 2018 g). Edited A. M. Orlova, I. I. Gordeeva, A. A. Sergeev.

- va. – Zvenigorod: Federal Research Institute of Fisheries and oceanography, 2018. – P. 64.
5. Boznak, E. I. Population structure of the whitefish *Coregonus lavaretus* (Salmonidae: Coregoninae) in the lake-river system of the Circumpolar Urals / E. I. Boznak, V. I. Ponomarev // Questions of ichthyology, – 2023. – Vol. 63, № 5. – P. 582–593.
6. Novoselov, A. P. Species and ecological diversity of the ichthyofauna of the Pechora River basin / A. P. Novoselov // Biology of inland waters. – 2021. – № 3. – P. 261–270.
7. Sendek, D. S. Genetic differentiation of whitefish in the Pechora River / D. S. Sendek, A. P. Novoselov, E. I. Boznak. – DOI: 10.15372/SEJ20160203 // Siberian Ecological Journal. – 2016. – Vol. 23, № 2. – P. 194–201.
8. Metal concentrations in fish tissues from Kara, Bolshoi Patok, and Maly Patok River basins, Northeastern European Russia / C. Hughson, V. I. Ponomarev, B. M. Kondratenok, T. R. Walker. – DOI: 10.1007/s44274-024-00058-w // Discov Environ 2, 27. – 2024. – P. 1–15.
9. Novoselov, A. P. Dynamics of the current state of whitefish in the Pechora River basin / A. P. Novoselov, I. I. Studenov // Proceedings of VNIRO. – 2014. – Vol. 151. – P. 141–150.
10. Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation dated October 23, 2019 No. 596 "On Approval of the List of especially valuable and valuable types of aquatic biological resources".
11. Nikol'skiy, G. V. Ecology of fish / G. V. Nikol'skiy. – Moscow: Higher school. – 1974. – 367 p.
12. Boznak, E. I. The maximum age of the common whitefish in the Pechora River basin / E. I. Boznak, V. I. Ponomarev. – DOI: 10.25750/1995-4301-2024-4-187–193 // Theoretical and applied ecology. – 2025. – № 1. – P. 187–193.
13. Antonova, V. P. Assessment of the impact of gas and oil production in the Western Arctic shelf zone on passing and semi-passing fish of the Kara and Barents Seas / V. P. Antonova, A. P. Novosyolov, N. A. Chuksina // Biological resources of the coastal Russian Arctic. – Moscow: VNIRO Publishing House, 2000. – P. 6–9.
14. Goluzina, A. D. The impact of oil and gas accidents on the content of petroleum products in the surface waters of the Pechora River basin / A. D. Goluzina // Problems and monitoring of natural ecosystems: Collection of articles of the X All-Russian Scientific and Practical Conference (Penza, 30 October 2023). – Penza: Penza State Agrarian University, 2023. – P. 32–36.
15. Methodological guide to the study of nutrition and food relations of fish in natural conditions / edited by. E. V. Borutskiy. – Moscow: Science. 1974. – 254 p.
16. Reshetnikov, Yu. S. Ecology and systematics of whitefish / Yu. S. Reshetnikov. – Moscow: Science, 1980. – 300 p.
17. Pravdin, I. F. Fish Study Guide / I. F. Pravdin. – Moscow: Food Industry, 1966. – 376 p.
18. Dryagin, P. A. Sexual cycles and fish spawning / P. A. Dryagin. – VNIORKH Publishing House. – 1949. – Vol. 28. – P. 3–113.
19. Ivanter, E. V. Introduction to quantitative biology: textbook for universities / E. V. Ivanter, A. V. Korosov. – Petrozavodsk: Petrozavodsk State University Publishing House, 2003. – 304 p.

20. Chaddock, R. E. Principles and methods of statistics / R. E. Chaddock. – Boston, New York [etc.]: Houghton Mifflin, 1925. – 471 p.

21. The impact of mining operations on the trout population of the Zimnaya Zolotitsa River / I. I. Studenov, A. M. Tortsev, G. M. Ustyuzhinskiy, D. V. Chupov // Salmon fishing: biology, reproduction, fishing: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference (Murmansk, 23–24 March 2023). – Murmansk: Russian Federal Research Institute of Fisheries and oceanography, 2023. – P. 429–433.

Информация об авторах

Э. А. Генрих – специалист лаборатории биоресурсов внутренних вод

А. В. Боровской – старший специалист лаборатории биоресурсов внутренних вод

С. В. Пастухов – специалист лаборатории прибрежных исследований

А. М. Торцев – кандидат биологических наук, заместитель руководителя

Н. С. Владыкина – заместитель заведующей лабораторией биоресурсов внутренних вод

Information about the authors

E. A. Genrikh – specialist at the laboratory of inland water bioresources

A. V. Borovskoy – senior specialist at the laboratory of inland water bioresources

S. V. Pastukhov – specialist at the laboratory of coastal research

A. M. Tortsev – Candidate of biology, deputy head

N. S. Vladykina – deputy head of the laboratory of inland water bioresources

Вклад авторов

Э. А. Генрих – идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи

А. В. Боровской – научное руководство

С. В. Пастухов – сбор материала, обработка материала

А. М. Торцев – научное руководство

Н. С. Владыкина – обработка материала

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

E. A. Genrikh – idea, material collection, material processing, writing an article

A. V. Borovskoy – scientific guidance

S. V. Pastukhov – material collection, material processing

A. M. Tortsev – scientific guidance

N. S. Vladykina – material processing

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 08.09.2025; одобрена после рецензирования 10.09.2025; принята к публикации 11.09.2025.

The article was submitted 08.09.2025; approved after reviewing 10.09.2025; accepted for publication 11.09.2025.

Научная статья

УДК 574.583

DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-39-53

**Видовой состав гетеротрофных микробных сообществ оз. Виштынецкого
Калининградской области в июне 2022-2023 гг.**

Анастасия Ивановна Моисеева

Калининградский государственный технический университет, Калининград,
Россия

nastya.m.1234@mail.ru

Аннотация. Оз. Виштынецкое – самое большое и глубокое в Калининградской области, относящееся к водоемам природного парка «Виштынецкий». По гидрохимическим показателям водоем отнесен к олиготрофным с некоторыми чертами мезотрофности в прибрежных зонах. Целью работы было установление видового состава гетеротрофных микробных сообществ озера Виштынецкого и выявление физиологических групп бактерий, участвующих в трансформации органических соединений. Материалом для исследований послужил гетеротрофный бактериопланктон воды из оз. Виштынецкого в июне 2022–2023 гг. В исследуемый период численность гетеротрофных бактерий в среднем не превышала $0,7 \times 10^3$ КОЕ/мл, что обычно соответствует олиготрофным водоемам. Отличия по численности гетеротрофных бактерий по годам исследования не выявлены. Установлены изменения количества гетеротрофов по станциям отбора проб, наибольшее значение микробного числа воды зафиксировано на мелководных, хорошо прогреваемых участках озера, наименьшее – в глубоководных зонах. Аналогичная закономерность колебаний численности гетеротрофов определена в зависимости от температуры воды на анализируемых станциях наблюдения. В микробных сообществах оз. Виштынецкого циркулируют виды бактерий, активно ферментирующих углеводы, расщепляющих белки, редуцирующих нитраты с образованием молекулярного азота. По численности преобладали виды бактерий, разлагающих широкий спектр углеводов и многоатомный спирт маннит. В видовом составе определены палочковидные бактерии родов *Aeromonas*, *Enterobacter*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, кокковые бактерии родов *Staphylococcus*, *Sarcina*. Для некоторых таксонов бактерий установлена как дезаминирующая активность, так и способность разлагать углеводы. Однородность структуры микробного сообщества, его биохимическая активность указывают на процессы самоочищения оз. Виштынецкого.

Ключевые слова: озеро Виштынецкое, микробные сообщества, видовой состав, гетеротрофные бактерии.

Для цитирования: Моисеева А. И. Видовой состав гетеротрофных микробных сообществ оз. Виштынецкого Калининградской области в июне 2022–2023 гг. // Известия КГТУ. 2025. № 79. С. 39–53. DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-39-53.

Original article

Species composition of the heterotrophic microbial communities of Lake Vishtynetskoe of the Kaliningrad region in June 2022-2023

Anastasiya I. Moiseeva

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

nastyam.1234@mail.ru

Abstract. Lake Vishtynetskoye is the largest and deepest lake in the Kaliningrad region, and it is a part of the Vishtynetsky Nature Park. According to the hydrochemical indicators, the lake is classified as oligotrophic with some mesotrophic characteristics in the coastal areas. The purpose of our study was to determine the species composition of the heterotrophic microbial communities in Lake Vishtynetskoe and to identify the physiological groups of bacteria involved in the transformation of organic compounds. The material of the research was heterotrophic bacterioplankton from Lake Vishtynetsky in June 2022-2023. During the study period, the average number of heterotrophic bacteria did not exceed $0,7 \times 10^3$ CFU/ml, which is typical for oligotrophic water bodies. No clear differences in the number of heterotrophs between the years of the study were found. Changes in the number of heterotrophs at the sampling stations, with the highest microbial number in the shallow, well-heated areas of the lake and the lowest in the deep-water zones were revealed. We also found a similar pattern of fluctuations in the number of heterotrophs depending on the water temperature at the observation stations. In the microbial communities of Lake Vishtynetsky, there are species of bacteria that actively ferment carbohydrates, break down proteins, and reduce nitrates to form molecular nitrogen. The abundance of bacteria that decompose a wide range of carbohydrates and the polyatomic alcohol mannitol is significant. Rod shape bacteria as *Aeromonas*, *Enterobacter*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, coccus bacteria as *Staphylococcus*, *Sarcina* were in water microflora. The uniformity of the microbial community structure and its biochemical activity indicate the self-purification processes in Lake Vishtynetskoe.

Keywords: Lake Vishtynetskoe, microbial communities, species composition.

For citation: Moiseeva A. I. Species composition of the heterotrophic microbial communities of Lake Vishtynetskoe of the Kaliningrad region in June 2022–2023. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2025;(79): 39–53. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-39-53.

ВВЕДЕНИЕ

Оз. Виштынецкое – самое большое и глубокое в Калининградской области [1], имеет ледниковое происхождение. Чаша озера разделена на северную и южную котловины [2]. Водоем относится к озерам с продольно-осевой проточностью, почти вся его акватория (за исключением бухты Тихой) – динамически активная зона с переносом вод с юга на север. Скорость постоянного течения в водоеме мала и составляет менее 1–2 см/с (кроме приустьевых участка р. Писсы). Для воды оз. Виштынецкого характерна довольно высокая условная (относительная) прозрачность, особенно в северной котловине. Прозрачность снижается по направлению от центральной части водоема к его берегам, достигая

значения 1 м [2]. По гидрохимическим показателям водоем отнесен к олиготрофным, однако для его прибрежной акватории (в районе баз отдыха у входа в бухту Тихую) характерен более высокий трофический уровень, чем в открытой части озера, при этом Утиный залив имеет выраженные черты эвтрофного водоема. Основную антропогенную нагрузку озеро получает со стоком с сельскохозяйственных полей, от населенных пунктов и рекреационных зон, расположенных на территории его водосборного бассейна [3].

Трофность озер также определяется по видовому составу микробных сообществ. Гетеротрофные бактерии играют ключевую роль в трофических взаимоотношениях планктонных организмов и циклах биогенных элементов в пресноводных экосистемах. Исследованиям гетеротрофного бактериопланктона олиготрофных озер, в том числе ледникового происхождения, посвящен ряд отечественных и зарубежных работ [4–20]. В оз. Плещеево [4] при изучении пространственного распределения микробных сообществ наибольшая плотность микроорганизмов выявлена в литоральной зоне, по тенденции увеличения количественных характеристик бактерий определили водоем как эвтрофный. Исследования бактериопланктона оз. Ильмень, основу которого формировали палочковидные и кокковидные формы, установили пространственную однородность в его распределении по акватории водоема в течение вегетационного сезона [5]. Микробное сообщество оз. Севан характеризовалось высоким разнообразием, в частности, деструкторами полимеров фитопланктона и зоопланктона, различными метилотрофами, диазотрофами и денитрификаторами, что свидетельствовало о большом количестве биогеохимических циклов в озере [6]. В бактериопланктоне пресного оз. Круглое преобладали гидролитические бактерии, биохимическая активность которых влияла на формирование состава воды в озере, все выделенные штаммы были аэробными гетеротрофами, характерными для пресноводных экосистем [7]. При изучении микробного сообщества пресных озер Бурятии выявили видовое сходство бактериальных филумов и различия в количественном распределении групп в сообществах. Отметим, что в микробном сообществе оз. Баунт, расположенного в зоне вечной мерзлоты, не обнаружено таксонов, являющихся индикаторами антропогенного загрязнения [8–10]. В оз. Байкал установлено, что микробные сообщества планктона и эпилимниона реагируют на изменения условий среды обитания уменьшением или увеличением доли различных физиологических групп и служат индикаторами при изучении уровня антропогенной нагрузки на экосистему озера. Наибольшие значения численности мезофильных аммонифицирующих гетеротрофных бактерий в озере фиксировали на станциях, расположенных в прибрежной части водоема и отобранных у уреза воды в местах отдыха населения, подверженных антропогенному воздействию. Между микробиомами пелагической и литоральной зон озера Байкал выявлено сходство, возможной причиной которого была максимальная стабильность поверхностных слоев воды [11–14]. Гетерогенность пространственного распределения бактериопланктона из-за разницы температур отмечена в различных частях Ладожского озера в начале лета. По микробиологическим показателям в этом озере выявлены отдельные зоны экологического риска, подверженные тому или иному виду антропогенного воздействия [15, 16]. В олиготрофном оз. Фусьян были усилены биохимические и микробиологические процессы, связанные с окислением метанола, метилотрофией, ферментацией, разложением ароматических соединений, денитрификацией, что подчеркивает жизненно важную роль бактерий в

круговороте углерода и азота [17, 18]. В оз. Большое Голубое развиваются микробные сообщества, участвующие в круговороте серы, в составе которых высока численность бесцветных серобактерий, окисляющих сероводород, что свидетельствует о важной роли серобактерий в процессе самоочищения водоема [20].

Таким образом, эколого-трофические группы микроорганизмов в олиготрофных озерах служат биоиндикаторами загрязнения водной среды и позволяют определить способность водоемов к самоочищению. Поэтому исследования микробных сообществ важны для оценки экологического состояния оз. Виштынецкого, которое в основном оценено по гидробиологическим и гидрохимическим параметрам [21–24], данные по бактериопланктону воды озера фрагментарны [25]. Целью работы было установление видового состава гетеротрофных микробных сообществ оз. Виштынецкого в июне 2022–2023 гг. и выявление физиологических групп бактерий, участвующих в трансформации органических соединений.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалом для исследований послужил гетеротрофный бактериопланктон воды из оз. Виштынецкого в июне 2022–2023 гг. Погодные условия во время отбора проб: безоблачно, средняя температура воздуха 29,1 °С, воды – 21,0 °С, слабое волнение, направление ветра 90°, тихий ветер (скорость от 0,3 до 1,5 м/с). Воду для микробиологического анализа отбирали при помощи батометра. Стерильную бутылку объемом 0,5 л, закрытую обтертой спиртом резиновой пробкой, при помощи троса опускали на глубину 1 м от поверхности воды и рывком при помощи другого троса, подходящего к горлышку бутылки, вытягивали резиновую пробку, при этом вода с нужного горизонта поступала в склянку. Поверхностную воду сливали и бутылку закрывали стерильной ватной пробкой [26]. Пробы отбирали с 7 станций, расположенных в прибрежной, центральной и южной частях водоема (рис. 1).

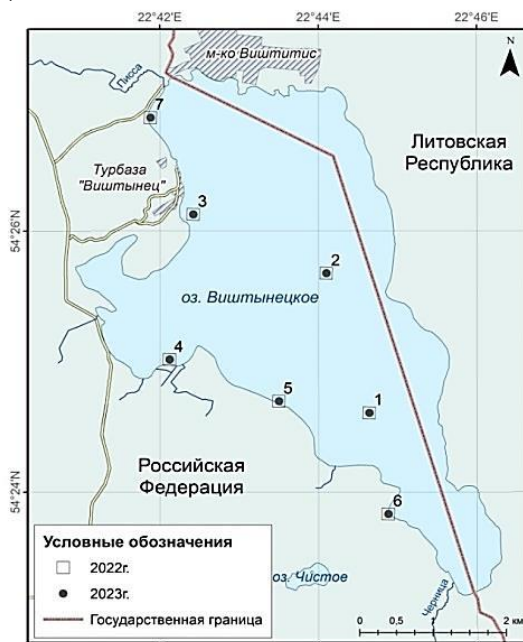


Рис. 1. Схема расположения станций отбора проб в озере Виштынецком
Fig. 1. Layout of sampling stations in Lake Vishtynetskie

При выборе точного места отбора руководствовались доступностью места отбора при любых погодных условиях и возможностью наблюдения и контроля всего водоема в целом. Всего было отобрано 14 проб воды (по 7 проб в каждый год исследования), выделено и изучено 152 штамма бактерий.

Применяли метод десятикратных разведений проб воды в стерильном физиологическом растворе, разведения проводили до 10^{-3} . Количественное содержание общего числа гетеротрофных бактерий оценивали по показателю общего микробного числа воды, который рассчитывали по числу выросших колоний на рыбопептонном агаре. Посевы инкубировали при температуре 37 °C в течение 72 часов.

Анализ физиологических групп гетеротрофных бактерий проводили по питательным средам специального назначения, аммонифицирующих бактерий учитывали на рыбопептонном бульоне, подвешивая в него под ватно-марлевые пробки фильтровальные бумажки, смоченные 10%-ным раствором уксуснокислого свинца (для определения сероводорода), и красную лакмусовую бумагу (для установления выделения аммиака). Наличие аммиака и сероводорода определяли по изменению цвета индикаторной бумаги (по почернению – сероводород, по посинению – аммиак) [27]. Денитрифицирующих бактерий определяли в среде с калийной селитрой по их способности редуцировать нитраты в нитриты, посевы инкубировали при температуре 37 °C. Редукцию нитратов в нитриты определяли путем добавления к культуре бактерий на рыбопептонном бульоне с калийной селитрой (KNO_3) через 3–4 дня инкубации 0,5 мл 10 % -го раствора серной или 20 % -го раствора уксусной кислоты и 0,5 мл раствора крахмала с йодистым калием. Появление коричневой или черной окраски смеси свидетельствовало о переходе нитратной соли в нитритную [27]. Способность бактерий к разложению аминокислот изучали на питательных средах с фенилаланином, аргинином, орнитином, лизином. Ферментативную активность бактерий к углеводам определяли на средах Гисса с мальтозой, лактозой, сахарозой, глюкозой, арабинозой, маннитом, фруктозой.

Видовую идентификацию бактерий осуществляли по совокупности культуральных, морфологических и физиолого-биохимических признаков с помощью определителей [28–30].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Численность гетеротрофных бактерий в июне 2022 г. в озере по станциям отбора проб изменялась в диапазоне от $0,1 \times 10^3$ до $1,7 \times 10^3$ КОЕ/мл (рис. 2).

Среднее значение численности микроорганизмов по всем станциям составило $0,5 \times 10^3$ КОЕ/мл. По мере продвижения к центральной и южной частям водоема отмечали снижение численности гетеротрофов до $0,1 \times 10^3$ КОЕ/мл на станции 1 и до $0,2 \times 10^3$ КОЕ/мл – на станции 2, что закономерно, так как данные станции отбора проб располагаются в глубоководных зонах озера. Наибольшие значения численности гетеротрофных бактерий зарегистрированы на мелководных участках озера, расположенных вблизи баз отдыха: на станции 3 общее количество бактерий в воде составляло $1,7 \times 10^3$ КОЕ/мл, на станции 7 – $1,2 \times 10^3$ КОЕ/мл. При анализе численности гетеротрофных бактерий в озере Виштынецком в июне 2023 г. по станциям отбора проб (рис. 2.) установили колебания численности

гетеротрофов от $0,1 \times 10^3$ до $2,0 \times 10^3$ КОЕ/мл. Среднее значение бактериальной обсемененности воды составило $0,8 \times 10^3$ КОЕ/мл. Высокие значения концентрации бактерий, как и в 2022 г., зафиксировали на мелководных станциях, расположенных вблизи баз отдыха: на станции 3 – $1,8 \times 10^3$ КОЕ/мл, на станции 7 – $2,0 \times 10^3$ КОЕ/мл.

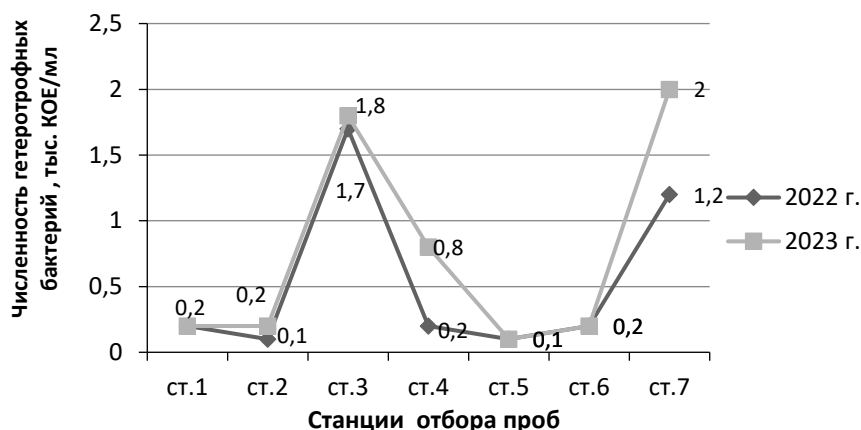


Рис. 2. Численность гетеротрофных (сапротрофных) бактерий оз. Виштынецкого в июне 2022–2023 гг.

Fig. 2. Number of heterotrophic bacterioplankton in Lake Vishtynetskie in June of 2022–2023

По численности гетеротрофных бактерий в воде согласно ГОСТ 17.1.2.04-77 [31] в исследуемый период оз. Виштынецкое отнесли к категории «чистые», что соответствует олигосапробным водам. Количественные изменения гетеротрофов по акватории озера зависели от места расположения станций отбора проб – более активное развитие бактерий происходило на мелководных прогреваемых участках. Температурный фактор также определял численность гетеротрофных бактерий в озере. На станциях с наибольшими глубинами (30 м на станции 1, 51 м на станции 2) при средней температуре воды $16,9^\circ\text{C}$ в июне 2022 г. средние значения обсемененности воды составляли $0,2 \times 10^3$ КОЕ/мл, такие же показатели фиксировали и в июне 2023 г. при средней температуре воды $21,0^\circ\text{C}$. На мелководных станциях (3–7 с глубинами от 1,5 до 3 м) в июне 2022 г. при средней температуре воды $18,9^\circ\text{C}$ и в июне 2023 г. при средней температуре воды $20,5^\circ\text{C}$ количество гетеротрофов в воде достигало $0,7 \times 10^3$ КОЕ/мл и $0,9 \times 10^3$ КОЕ/мл соответственно.

Таким образом, определили, что в оз. Виштынецком, в мелководных прогреваемых зонах, расположенных вблизи баз отдыха, активно развиваются гетеротрофные бактерии. Численность гетеротрофов в глубоководных и мелководных зонах озера также зависит от температуры воды.

Гетеротрофное микробное сообщество оз. Виштынецкого отличалось различной биохимической активностью, при этом в течение двух лет наблюдений доля штаммов, способных к деструкции органических соединений, оставалась примерно на одном количественном уровне, существенных различий соотношения физиологических групп бактерий не отмечали (рис. 3).

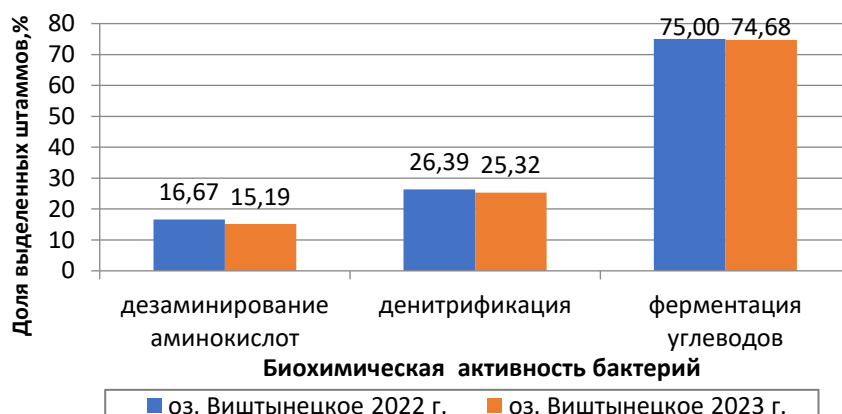


Рис. 3. Доля выделенных штаммов гетеротрофных бактерий оз. Виштынецкого в зависимости от их биохимических свойств

Fig. 3. Proportion of isolated heterotrophic bacteria strains from Lake Vishtynetskoe, depending their biochemical properties

Изучение биохимической активности гетеротрофных бактерий показало, что в микробных сообществах оз. Виштынецкого преобладали бактерии, способные к ферментации углеводов и многоатомного спирта маннита. Бактерии ассимилировали достаточно широкий спектр углеводных субстратов (табл. 1).

Таблица 1. Ассимиляция углеводных субстратов микробного сообщества оз. Виштынецкого

Table 1. Assimilation of carbohydrate substrates by the microbial community of Lake Vishtynetsky

Наименование углевода	Количество штаммов, способных к ассимиляции, %
Глюкоза	7,69
Сахароза	5,77
Лактоза	1,92
Арабиноза	1,92
Мальтоза	1,92
Маннит	69,23

Подавляющее большинство штаммов бактерий ферментировали маннит, другими предпочтительными для ферментации были глюкоза и сахароза. Наличие углеводов в воде озера может быть связано с различными источниками растворенных органических веществ, в частности, с фотосинтетической активностью фитопланктона или выделением органического материала из клеток зоопланктона.

Достаточно большое количество штаммов занимали бактерии, способные к денитрификации – процессу восстановления нитратов в нитриты, аммиак и далее до молекулярного азота. Активность денитрифицирующих бактерий наблюдается при недостатке кислорода в воде. Кроме того, при массовом развитии денитрификаторов скапливается молекулярный азот, недоступный для водорослей.

Меньшую долю составляли бактерии, дезаминирующие аминокислоты. Вероятно, процессы минерализации органических азотсодержащих соединений в оз. Виштынецком в начале летнего сезона происходят менее интенсивно.

Видовой состав микробного сообщества оз. Виштынецкого в июне 2022–2023 гг. по его биохимическим характеристикам представлен в табл. 2.

Таблица 2. Видовой состав гетеротрофных микробных сообществ оз. Виштынецкого в июне 2022 и 2023 гг.

Table 2. Species composition of heterotrophic microbial communities of Lake Vishtynetskoe in 2022 and 2023.

Физиологическая группа бактерий	Вид бактерий
Минерализующие органические соединения (моносахариды, олигосахариды, многоатомный спирт)	<i>Aeromonas schubertii</i> (Hickman-Brenner et al., 1989) <i>Aeromonas sobria</i> (Popoff and Véron, 1981) <i>Aeromonas caviae</i> (Popoff, 1984) <i>Enterobacter hormaechei</i> (O'Hara et al., 1990) <i>Bacillus sphaericus</i> (Meyer and Neide, 1904) <i>Bacillus brevis</i> (Migula, 1900) <i>Bacillus circulans</i> (Jordan, 1890) <i>Sarcina ventriculi</i> (Goodsir, 1842) <i>Pseudomonas pseudoalcaligenes</i> (Stanier, 1966) <i>Staphylococcus epidermidis</i> (Evans, 1916)
Денитрифицирующие	<i>Bacillus firmus</i> (Donk, 1920) <i>Staphylococcus epidermidis</i> (Evans, 1916) <i>Bacillus pantothenicus</i> (Proom and Knight, 1950)
Бактерии, дезаминирующие аминокислоты	<i>Pseudomonas pseudoalcaligenes</i> (Stanier, 1966) <i>Bacillus circulans</i> (Jordan, 1890) <i>Enterobacter hormaechei</i> (O'Hara et al., 1990) <i>Aeromonas sobria</i> (Popoff and Véron, 1981) <i>Staphylococcus epidermidis</i> (Evans, 1916)

В видовом составе бактерий, ферментирующих углеводы и многоатомный спирт маннит, было обнаружено достаточно большое разнообразие видов бактерий. Преобладали палочковидные бактерии родов *Aeromonas*, *Enterobacter*, *Pseudomonas*, *Bacillus* и кокки рода *Sarcina*. В сообществе денитрифицирующих бактерий доминировали споровые бациллы, также нитратредуктазой обладали стафилококки. К дезаминированию аминокислот были способны *P. pseudoalcaligenes*, *E. hormaechei*, *St. epidermidis*, *A. sobria*, эти же виды бактерий ферментировали углеводы. Таким образом, в исследуемый нами период микробное сообщество воды оз. Виштынецкого формировалось типичными представителями гетеротрофного бактериопланктона, характерного для микробиоценозов пресноводных водоемов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гетеротрофные микробные сообщества озерных экосистем играют важную роль в биогеохимических циклах и процессах, при этом быстро реагируют на изменения концентрации и доступности питательных веществ, изменяя свою структуру и разнообразие. Биохимическая активность бактерий способствует естественному самоочищению водоемов.

В исследуемый период численность гетеротрофных бактерий в воде оз. Виштынецкого в среднем не превышала $0,7 \times 10^3$ КОЕ/мл, что обычно соответствует олиготрофным водоемам. Не были выявлены явные отличия по численности гетеротрофов по годам исследования. Установлены изменения количества гетеротрофов по станциям отбора проб, наибольшее значение микробного числа воды зафиксировано на мелководных, хорошо прогреваемых участках озера, наименьшее – в глубоководных зонах. Аналогичная закономерность колебаний численности гетеротрофов наблюдалась в зависимости от температуры воды на анализируемых станциях наблюдения.

Биохимические особенности гетеротрофных бактерий воды озера служат индикаторами уровня трофности водоема и позволяют выявить особенности функционирования бактериальных сообществ в зависимости от наличия органического вещества. Определено, что в микробных сообществах озера Виштынецкого циркулируют виды бактерий, активно ферментирующих углеводы, расщепляющих белки, редуцирующих нитраты с образованием молекулярного азота. По численности преобладали виды бактерий, разлагающих широкий спектр углеводов. В то же время выявлено, что некоторые углеводрасщепляющие бактерии также способны дезаминировать аминокислоты. Наличие углеводов в воде озера, возможно, связано с фотосинтетической активностью фитопланктона или выделением органического материала из клеток зоопланктона, процессы денитрификации осуществляются бактериями при недостатке кислорода в воде, минерализация белковых веществ активно протекает на начальных стадиях самоочищения. Однородность структуры микробного сообщества, его биохимическая активность указывают на процессы самоочищения оз. Виштынецкого.

Список источников

1. Озеро Виштынецкое / Н. К. Алексеев, А. Г. Демидова, Т. А. Берникова [и др.]. – Калининград: Калининградское книжное издательство, 1976. – 47 с.
2. Виштынецкое озеро: природа, история, экология / В. В. Орленок, Г. М. Барина, П. П. Кучерявый, Г. Л. Ульяшев. – Калининград, 2000. – 185 с. – ISBN 5-88874-162-0.
3. Современное состояние исследований морфологических особенностей озера Виштынецкого / С. В. Шибаев, Т. А. Берникова, А. В. Алдушин, Д. М. Лях // Инновации в науке и образовании: VI юбил. междунар. науч. конф., посвященная 50-летию пребывания КГТУ на Калининградской земле (21–23 октября 2008 г.): труды. – Калининград: ФГОУ ВПО «КГТУ», 2008. – С. 156–158.
4. Романенко, А. В. Современное структурно-функциональное состояние бактериопланктона озера Плещеево / А. В. Романенко // Труды Института биологии внутренних вод РАН, 2019. – Вып. 86 (89). – С. 7–22.

5. Современное состояние бактериопланктона оз. Ильмень / Л. Л. Капустина, А. А. Быстрова, А. С. Прищепа, Е. М. Соловьева // Труды ВНИРО, 2023. – Т. 193. – С. 140–151.
6. Микробное сообщество озера Севан / И. Тихонова, Г. Геворгян, А. Краснопеев [и др.] // 13-й съезд гидробиологического общества при Российской академии наук. Архангельск, 16–20 сентября 2024 года. – Архангельск, 2024. – С. 165.
7. Абидуева, Е. Ю. Бактериальное разнообразие пресного озера Круглое (Селенгинский район, Бурятия) / Е. Ю. Абидуева, Е. Б. Кудряшова, Н. В. Присяжная // Материалы междунар. науч.-практ. конф., посвященной 85-летию доктора ветеринарных наук, профессора, Заслуженного деятеля науки Российской Федерации Тарнуева Юрия Абогоевича. – Улан-Удэ, 2024. – С. 141–144.
8. Дагурова, О. П. Разнообразие микробного сообщества пресного озера Баянгол / О. П. Дагурова, Б. В. Цыденова, С. В. Зайцева. – DOI: 10.18101/2542-0623-2023-3-31-39 // Природа внутренней Азии. – 2023. – № 3 (25). – С. 31–39.
9. Особенности микробных сообществ пресных озер Бурятии / О. П. Дагурова, С. В. Зайцева, Б. В. Цыденова [и др.]. – DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-870 // Limnology and freshwater biology. – 2024. – № 4. – С. 870–876.
10. Зайцева, С. В. Комплекс микробиологических показателей в оценке экологического состояния пресных водоемов Бурятии / С. В. Зайцева, О. П. Дагурова, Л. П. Козырева // Трансграничные территории востока России: факторы, возможности и барьеры развития: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Улан-Удэ, 2021. – С. 336–338.
11. Мошарова, И. В. Оценка современного состояния прибрежных вод южной части озера Байкал по санитарно-микробиологическим показателям с применением тест-систем / И. В. Мошарова, В. В. Ильинский, О. В. Ильина. – DOI: 10.35627/2219-5238/2018-306-9-54-58 // Здоровье населения и среда обитания. – 2018. – № 9 (306). – С. 54–58.
12. Оценка сезонной динамики генетического и таксономического состава бактериальных сообществ в пелагиали и литорали озера Байкал / А. Ю. Краснопеев, Ю. С. Букин, А. Д. Галачьянц [и др.] // VIII Пущинская конференция «Биохимия, физиология и биосферная роль микроорганизмов», школа-конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Генетические технологии в микробиологии и микробное разнообразие» (Пущино, 06–08 декабря 2022 г.). – Москва, 2022. – С. 155–157.
13. Сезонные и пространственные вариации численности аммонифицирующих и денитрифицирующих бактерий в сообществах планктона и эпилимнтона литорали оз. Байкал / Г. В. Подлесная, М. Ю. Суслова, Ю. Р. Штыкова [и др.]. – DOI: 10.15372/SEJ20210512 // Сибирский экологический журнал. – 2021. – № 5. – С. 641–652.
14. Оценка качества воды озера Байкал и его притоков в местах воздействия локального загрязнения по микробиологическим и гидрохимическим данным / А. С. Марцинечко, Е. П. Чебыкин, Н. С. Чебунина, Ю. Р. Захарова. – DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-998 // Limnology and freshwater biology. – 2024. – № 4. – С. 998–1019.
15. Белозерова, Д. В. Санитарно-микробиологическая характеристика среды обитания водных биоресурсов в Ладожском озере / Д. В. Белозерова,

Л. Л. Капустина. – DOI: 10.36038/2307-3497-2021-185-94-104 // Труды ВНИРО. – 2021. – Т. 185. – С. 94–104.

16. Митрукова, Г. Г. Экологическая оценка качества вод литоральной зоны Ладожского озера по результатам микробиологических исследований / Г. Г. Митрукова, Л. Л. Капустина, Е. А. Курашов. – DOI: 10.17076/lim127 // Труды Карельского научного центра РАН. – 2020. – № 9. – С. 88–100.

17. Extreme trophic tales: deciphering bacterial diversity and potential functions in oligotrophic and hypereutrophic lakes / Xie Guijuan, Zhang Yuqing, Gong Yi [et al] // BMC Microbiology. – 2024. – № 24. – P. 1–16.

18. Distinct ecological niches and community dynamics: understanding free-living and particle-attached bacterial communities in an oligotrophic deep lake / Xie Guijuan, Sun Chuanbo, Luo Wenlei [et al.] // Applied and Environmental Microbiology. – 2024. – Vol. 90. – P. 1–20.

19. Голованева, А. Е. Микробиологическая трансформация азота в озере Халактыском (Камчатский край) / А. Е. Голованева, Н. А. Ступникова. – DOI: 10.23670/IRJ.2020.96.6.045 // Международный научно-исследовательский журнал. – 2020. – № 6 (96). – С. 38–44.

20. Морозова, О. В. Микробные сообщества воды и донных отложений озера Большое Голубое (Республика Татарстан) / О. В. Морозова, Р. П. Токинова, Д. С. Любарский. – DOI: 10.24852/2411-7374.2022.3.13.20 // Российский журнал прикладной экологии. – 2022. – № 3. – С. 12–19.

21. Летний зоопланктон озера Виштынецкого как кормовая база европейской ряпушки в период нагула / Е. В. Кривоускова, М. Н. Шибаева // Материалы VIII Междунар. Балтийского морского форума 5–10 октября 2020 г.: в 6 т. Т. 3. Водные биоресурсы, аквакультура и экология водоемов. – Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2020. – С. 79–83.

22. Мычкова, А. В. Зоопланктон прибрежной части озера Виштынецкого в зимний период и его роль в питании европейской ряпушки (*Coregonus albula*) / А. В. Мычкова, Е. В. Кривоускова, М. Н. Шибаева. – DOI: 10.46845/1997-3071-2025-771-26-39 // Вестник молодежной науки. – 2017. – С. 1–5.

23. Масюткина, Е. А. Оценка экологического состояния оз. Виштынецкого с применением различных гидробиологических индексов / Е. А. Масюткина // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. – 2014. – вып. 7. – С. 66–76.

24. Шибаева, М. Н. Оценка экологического состояния прибрежной части озера Виштынецкого по гидробиологическим показателям / М. Н. Шибаева, Е. В. Кривоускова // Материалы VII Междунар. Балтийского морского форума 7–12 октября 2019 г.: в 6 т. Т. 3. Водные биоресурсы, аквакультура и экология водоемов. – Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2019. – С. 306–311.

25. Моисеева, А. И. Бактериопланктон некоторых водоемов Калининградской области (озеро Виштынецкое, озеро Чайка) в летний сезон 2022–2023 гг. / А. И. Моисеева, Е. В. Авдеева // Материалы VII Междунар. Балтийского морского форума 7–12 октября 2024 г.: в 6 томах. Т. 3. Водные биоресурсы, аквакультура и экология водоемов. – Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2019. – С. 306–311.

26. Кузнецов, С. И. Методы изучения водных микроорганизмов / С. И. Кузнецов, Г. А. Дубинина. – Москва: Наука, 1989. – 288 с. – ISBN 5-02-004020-7.
27. Практикум по микробиологии / под ред. Н. С. Егорова. – Москва, 1976. – 307 с.
28. Определитель бактерий Берджи / под ред. Дж. Хоулта, Н. Крига, П. Снита, Дж. Стейли, С. Уильямса. – Москва: Мир, 1997. – Т. 1. – 432 с. – ISBN 5-03-003111-1.
29. Определитель бактерий Берджи / под ред. Дж. Хоулта, Н. Крига, П. Снита, Дж. Стейли, С. Уильямса. – Москва: Мир, 1997. – Т. 2. – 368 с. – ISBN 5-03-003111-1.
30. Краткий определитель бактерий Берги / под ред. Дж. Хоулта. – Москва: Мир, 1980. – 495 с.
31. ГОСТ 17.1.2.04-77. Охрана природы. Гидросфера. Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных водных объектов // Сб. ГОСТов. – Москва: ИПК «Изд-во стандартов», 2000. – 62 с.

References

1. Lake Vishtynetskoye / N. K. Alekseev, A. G. Demidova, T. A. Bernikova [et al.]. – Kaliningrad: Kaliningrad Book Publishing House, 1976. – 47 p.
2. Vishtynetskoe Lake: Nature, History, and Ecology / V. V. Orlenok, G. M. Barinova, P. P. Kucheryavy, G. L. Ulyashev. – Kaliningrad, 2000. – 185 p. – ISBN 5-88874-162-0.
3. Current state of research on the morphological features of Lake Vishtynetskoe / S. V. Shibaev, T. A. Bernikova, A. V. Aldushin, D. M. Lyakh // Innovations in science and education: The VI anniversary international scientific conference dedicated to the 50th anniversary of KSTU (October 21–23, 2008): proceedings. – Kaliningrad: FSEI HPE "KSTU", 2008. – P. 156–158.
4. Romanenko, A. V. Modern structural and functional state of bacterioplankton of Lake Pleshcheyevo / A. V. Romanenko // Proceedings of the Institute of Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences, 2019. – Issue 86 (89). – P. 7–22.
5. Current state of bacterioplankton in the Lake Ilmen / L. L. Kapustina, A. A. Bystrova, A. S. Prishchepa, E. M. Solovyova // Proceedings of VNIRO, 2023. – Vol. 193. – P. 140–151.
6. Microbial community of Lake Sevan / I. Tikhonova, G. Gevorgyan, A. Krasnopeev [et al.] // 13th Congress of the Hydrobiological Society at the Russian Academy of Sciences. Arkhangelsk, September 16–20, 2024. – Arkhangelsk, 2024. – P. 165.
7. Abidueva, E. Y. Bacterial diversity of freshwater Lake Krugloye (Selenginsky district, Buryatia) / E. Y. Abidueva, E. B. Kudryashova, N. V. Prisyazhnaya // Proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the 85th anniversary of the Doctor of Veterinary Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation Tarnuev Yuri Abogoevich. – Ulan-Ude, 2024. – P. 141–144.
8. Dagurova, O. P. Diversity of the microbial community of the freshwater lake Baunt / O. P. Dagurova, B. V. Tsydenova, S. V. Zaitseva. – DOI: 10.18101/2542-0623-2023-3-31-39 // The nature of Inner Asia. – 2023. – № 3 (25). – P. 31–39.

9. Features of microbial messages in freshwater lakes of Buryatia / O. P. Dagurova, S. N. Zaitseva, B. V. Tsydenova [et al.]. – DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-870 // *Limnology and freshwater biology*. – 2024. – №. 4. – P. 870–876.
10. Zaitseva, S. V. A complex of microbiological indicators in the assessment of the ecological state of freshwater reservoirs in Buryatia / S. V. Zaitseva, O. P. Dagurova, L. P. Kozyreva // *Transborder territories of the East of Russia: factors, opportunities and barriers to development: proceedings of the international scientific and practical conference*. – Ulan-Ude, 2021. – P. 336–338.
11. Mosharova, I. V. Assessment of the current state of the coastal waters of the southern part of Lake Baikal by sanitary and microbiological indicators using test systems / I. V. Mosharova, V. V. Ilyinsky, O. V. Ilyina. – DOI: 10.35627/2219-5238/2018-306-9-54-58 // *Population health and habitat*. – 2018. – № 9 (306). – P. 54–58.
12. Assessment of the seasonal dynamics of the genetic and taxonomic composition of bacterial communities in the pelagial and littoral of Lake Baikal / A. Y. Krasnopeev, Y. S. Bukin, A. D. Galachyants [et al.] // VIII Pushchina Conference "Biochemistry, physiology and biospheric role of microorganisms", school-conference of young scientists, graduate students and students "Genetic technologies in Microbiology and Microbial Diversity", Pushchino, December 06-08, 2022. – Moscow, 2022. – P. 155–157.
13. Seasonal and spatial variations in the abundance of ammonifying and denitrifying bacteria in plankton and epilithon communities of the littoral of Lake Baikal / G. V. Podlesnaya, M. Y. Suslova, Y. R. Shtykova [et al.]. – DOI: 10.15372/SEJ20210512 // *Siberian Ecological Journal*. – 2021. – № 5. – P. 641–652.
14. Assessment of the water quality of Lake Baikal and its tributaries in places affected by local pollution according to microbiological and hydrochemical data / A. S. Marcinechko, E. P. Chebykin, N. S. Chebunina, Y. R. Zakharova. – DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-998 // *Limnology and freshwater biology*. – 2024. – № 4. – P. 998–1019.
15. Belozerova, D. V. Sanitary and microbiological characteristics of the habitat of aquatic biological resources in Lake Ladoga / D. V. Belozerova, L. L. Kapustina. – DOI: 10.36038/2307-3497-2021-185-94-104 // *Proceedings of VNIRO*. – 2021. – Vol. 185. – P. 94–104.
16. Mitrukova, G. N. Ecological assessment of the water quality of the littoral zone of Lake Ladoga based on the results of microbiological studies / G. N. Mitrukova, L. L. Kapustina, E. A. Kurashov. – DOI: 10.17076/lim127 // *Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. – 2020. – №. 9. – P. 88–100.
17. Extreme trophic tales: deciphering bacterial diversity and potential functions in oligotrophic and hypereutrophic lakes / Xie Guijuan, Zhang Yuqing, Gong Yi [et al.] // *BMC Microbiology*. – 2024. – №. 24. – P. 1–16.
18. Distinct ecological niches and community dynamics: understanding free-living and particle-attached bacterial communities in an oligotrophic deep lake / Xie Guijuan, Sun Chuanbo, Luo Wenlei [et al.] // *Applied and Environmental Microbiology*. – 2024. – Vol. 90. – P. 1–20.
19. Golovaneva, A. E. Microbiological transformation of nitrogen in Lake Khalaktyisky (Kamchatka Territory) / A. E. Golovaneva, N. A. Stupnikova. – DOI: 10.23670/IRJ.2020.96.6.045 // *International Scientific Research Journal*. – 2020. – № 6 (96). – P. 38–44.

20. Morozova, O. V. Microbial communities of water and bottom sediments of Bolshoe Goluboe Lake (Republic of Tatarstan) / O. V. Morozova, R. P. Tokinova, D. S. Lyubarsky. – DOI: 10.24852/2411-7374.2022.3.13.20 // Russian Journal of Applied Ecology. – 2022. – № 3. – P. 12–19.
21. Summer zooplankton of Lake Vishtynetsky as a feeding base for European grouse during the feeding season / E. V. Krivopuskova, M. N. Shibaeva // Proceedings of the VIII International Baltic Maritime Forum on October 5–10, 2020: in 6 vol. Vol. 3. Aquatic bioresources, aquaculture and ecology of reservoirs. – Kaliningrad: Publishing House of the BFFSA KSTU, 2020. – P. 79–83.
22. Mychkova, A. V. Zooplankton of the coastal part of Lake Vishtynetsky in winter and its role in the nutrition of the European grouse (*Coregonus albula*) / A. V. Mychkova, E. V. Krivopuskova, M. N. Shibaeva – DOI: 10.46845/1997-3071-2025-771-26-39 // Bulletin of Youth Science. – 2017. – P. 1–5.
23. Masyutkina, E. A. Assessment of the ecological state of Lake Vishtynetskoe using various hydrobiological indices / E. A. Masyutkina // Bulletin of the Baltic Federal University named after I. Kant. – 2014. – issue 7. – P. 66–76.
24. Shibaeva, M. N. Assessment of the ecological state of the coastal part of Lake Vishtynetskoe by hydrobiological indicators / M. N. Shibaeva, E. V. Krivopuskova // Proceedings of the VII International Baltic Maritime Forum on October 7–12, 2019: in 6 vol. Vol. 3. Aquatic bioresources, aquaculture and ecology of reservoirs. – Kaliningrad: Publishing House of the BFFSA KSTU, 2019. – P. 306–311.
25. Moiseeva, A. I. Bacterioplankton of some reservoirs of the Kaliningrad region (Lake Vishtynetskoe, Lake Chaika) in the summer season of 2022–2023 / A. I. Moiseeva, E. V. Avdeeva // Proceedings of the VII International Baltic Marine Forum on October 7–12, 2024: in 6 vol. Vol. 3. Aquatic bioresources, aquaculture and ecology of reservoirs. – Kaliningrad: Publishing House of the BFFSA KSTU, 2019. – P. 306–311.
26. Kuznetsov, S. I. Methods of studying aquatic microorganisms / S. I. Kuznetsov, G. A. Dubinina. – Moscow: Nauka Publ., 1989. – 288 p. – ISBN 5-02-004020-7.
27. Practicum on microbiology / edited by N. S. Egorov. – Moscow, 1976. – 307 p.
28. The determinant of Bergey bacteria / edited by J. Hoult, N. Krieg, P. Sneath, J. Staley, S. Williams. – Moscow: Mir Publ., 1997. – Vol. 1. – 432 p. – ISBN 5-03-003111-1.
29. The determinant of Bergey bacteria / edited by J. Hoult, N. Krieg, P. Sneath, J. Staley, S. Williams. – Moscow: Mir Publ., 1997. – Vol. 2. – 368 p. – ISBN 5-03-003111-1.
30. A brief definition of Bergey bacteria / edited by J. Hoult. – Moscow: Mir Publ., 1980. – 495 p.
31. GOST 17.1.2.04-77. Nature Protection. Hydrosphere. Indicators of the State and Rules of Taxation of Fishery Water Objects // Collection of State Standards. – Moscow: House of Standards Publ., 2000. – 62 p.

Информация об авторе

А. И. Моисеева – аспирант кафедры водных биоресурсов и аквакультуры

Information about the author

A. I. Moiseeva – Postgraduate student of the Department of Aquatic Bioresources and Aquaculture

Статья поступила в редакцию 11.07.2025; одобрена после рецензирования 23.07.2025; принята к публикации 01.08.2025.

The article was submitted 11.07.2025; approved after reviewing 23.07.2025; accepted for publication 01.08.2025.

Научная статья

УДК 59.088.577.11.53

DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-54-67

Исследование пула жирных кислот в мышцах радужной форели *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792) из садковой аквакультуры (р. Ангара, г. Иркутск)

Галина Афанасьевна Федорова¹, Алена Александровна Никонова², Ольга Александровна Белых³, Ольга Юрьевна Глызина⁴

^{1,2,4} Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

³ Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

¹ fgalina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1697-8631>

² alenaxis@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5599-0329>

³ olga.belykh@klgtu.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-7274-1420>

⁴ ladis1961@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6449-0497>

Аннотация. Впервые проведен биохимический анализ садковой аквакультуры радужной форели, содержащейся в р. Ангаре. Тестируемые особи содержались в садках в черте г. Иркутска при температуре 12–15 °С, получали корм Appens GROWER EF (Alltech Coppens, ФРГ) в количестве 2 % от веса рыб. Определение содержания жирных кислот (ЖК) в экстрактах липидной фракции тканей (белые мышцы) рыб выполняли методами газовой хроматографии с масс-спектрометрическим (ГХ-МС) и пламенно-ионизационным детектированием (ГХ-ПИД). Выявлены взаимосвязи состава корма и физиологических и биохимических процессов роста и развития аквакультуры форели. Исследованы липиды белых мышц половозрелых особей *Parasalmo mykiss*, содержащихся в садках прибрежной пелагиали реки. В составе общих липидов в мышцах исследованных особей доминировали докозагексаеновая и олеиновая кислоты. Показана роль ω -3 и ω -6 жирных кислот в организме рыб и их соотношение, приведены новые данные о механизме действия этих кислот. Рекомендовано соотношение ω -3 и ω -6 1:1. Рассмотрена ценность потребления радужной форели как источника полиненасыщенных кислот. Установлено высокое содержание физиологически значимых ω -3 полиненасыщенных жирных кислот в мышцах садковой аквакультуры радужной форели. Указано, что в качестве полноценных продуктов питания лучше использовать мясо рыбы, чем ее жир. Полученные данные характеризуют исследованных рыб как качественный продукт аквакультуры, содержащий высокий процент эссенциальных жирных кислот на фоне хорошей адаптации рыб к условиям их содержания, включающим кормовую базу.

Ключевые слова: лососевые рыбы, липиды, радужная форель, жирные кислоты, комбикорм, аквакультура.

Для цитирования: Федорова Г. А., Никонова А. А., Белых О. А., Глызина О. Ю. Исследование пула жирных кислот в мышцах радужной форели *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792) из садковой аквакультуры (р. Ангара, г. Иркутск) // Известия КГТУ. 2025. № 79. С. 54–67. DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-54-67.

Original article

Study of fatty acids in the muscles of garden aquaculture rainbow trout *Parasalmo mykiss* (Angara river, Irkutsk)

Galina A. Fedorova¹, Alyona A. Nikonova², Ol'ga A. Belykh³✉, Ol'ga Yu. Glyzina⁴

^{1,2,4} Limnological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

³ Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

¹ fgalina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1697-8631>

² alenaxis@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5599-0329>

³ olga.belykh@klgtu.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-7274-1420>

⁴ ladis1961@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6449-0497>

Abstract. The article presents a biochemical analysis of cage aquaculture of rainbow trout contained in the Angara River that has been carried out for the first time. The tested individuals were kept in cages on the Angara River, within the city of Irkutsk, at a temperature of 12-15. We received the feed Appens GROWER EF in the amount of 2% of the fish weight. Determination of the LC content in extracts of the lipid fraction of fish tissues (white muscles) have been performed by gas chromatography with mass spectrometric and flame ionization detection methods. The interrelationships of the feed composition and the physiological and biochemical processes of growth and development of trout aquaculture have been revealed. Lipids of white muscles of mature *Parasalmo mykiss* individuals kept in cages of the coastal pelagic river have been studied. Docosahexaenoic and oleic acids dominated in the total lipids in the muscles of the studied individuals. The role of ω -3 and ω -6 fatty acids in the body of fish and their ratio has been discussed. The article considers the value of consuming rainbow trout as a source of polyunsaturated acids. A high content of physiologically significant ω -3 polyunsaturated fatty acids has been found in the muscles of rainbow trout from the Angara River cage aquaculture. It is indicated that it is better to use fish meat as full-fledged food than its fat. The data obtained characterize the fish studied as a high-quality aquaculture product containing a high percentage of essential fatty acids against the background of a good adaptation of fish to the conditions of their maintenance, including feed.

Key words: salmon fish, lipids, rainbow trout, fatty acids, compound feed, aquaculture.

For citation: Fedorova G. A., Nikonova A. A., Belykh O. A., Glyzina O. Yu. Study of fatty acids in the muscles of garden aquaculture rainbow trout *Parasalmo mykiss* (Angara river, Irkutsk). *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2025;(79):54–67. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-54-67.

ВВЕДЕНИЕ

Рыба и рыбная продукция являются основным источником эссенциальных жирных кислот, необходимых в рационе питания человека. Липидные компоненты (в том числе жирные кислоты, ЖК) необходимы для нормального обмена веществ, и их отсутствие или недостаток в рационе питания может привести к различным заболеваниям, поскольку липиды влияют на процессы всасывания, трансформации и обмена жиров в организме.

Радужная форель – один из распространенных объектов аквакультуры. Содержание жира и, соответственно, вкусовые качества форели могут меняться в зависимости от времени года и стадии созревания половых продуктов. Исследования последних лет показывают, что качество аквакультуры рыб зависит от биологических особенностей рыб, условий содержания и кормления и определяет пищевую ценность рыбной продукции [1–4].

Существует ряд комплексных работ по оценке состояния морских рыб на основании биохимических показателей [5–8] и рыб, выловленных из внутренних водоемов [9]. Исследований на пресноводных рыбах, обитающих в естественных условиях, проведено значительно меньше.

В последнее время вопросам жирнокислотного состава морских и пресноводных промысловых гидробионтов уделяется особое внимание. Сравнение жирнокислотного состава образцов рыбы с фермы и «дикой» форели выявило более высокое содержание ЖК в образцах рыбы с ферм. Все рыбы, выведенные на фермах, обладали более высоким содержанием эйкозапентаеновой (ЭПК), докозагексаеновой (ДГК) и олеиновой кислот, чем дикие. В условиях аквакультуры стальноголовая форель (Steelhead) способна регулировать состав жирных кислот в организме независимо от их содержания в корме, что предоставляет возможность селекционного разведения форели с большей пищевой ценностью [10].

Физиологически значимые ЖК ω -3 и ω -6 относят к важным для питания человека липидам. Установлено, что для животной клетки оптимальное соотношение жирных кислот ω -6/ ω -3 в суточном рационе должно составлять от 5:1 до 10:1 [2, 3, 11], поэтому при получении аквакультуры пресноводных рыб важно контролировать параметры липидного статуса – содержание эссенциальных ненасыщенных жирных кислот и их соотношение.

Поступление физиологически значимых ЖК с кормом в необходимых концентрациях имеет решающее значение для быстрого роста рыб [12]. ЖК участвуют в транспорте жирорастворимых витаминов и являются предшественниками эйкозаноидов и гормонов у рыб [13]. Экзогенные ЖК влияют на репродукцию, осморегуляцию, иммунитет (устойчивость к болезням) и реакцию рыб на стрессы.

Данная работа относится к начальному этапу исследований состава ЖК в мышцах радужной форели садковой аквакультуры как маркера адаптации рыбы к условиям холодноводного водоема.

Цель работы – оценка жирнокислотного состава мышц радужной форели *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792) холодноводной садковой аквакультуры при кормлении рыб комбикормом без добавления в рацион питания живых кормов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Особь радужной форели *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792), отобранные для исследования, содержались в садках единственного в регионе предприятия ООО НПО «Иркутская форель» на р. Ангаре, в черте г. Иркутска. Температура воды составляла 12–15°C. Форель регулярно проходит проверку специалистами ветеринарной службы и Россельхознадзора на соответствие стандартам.

Для кормления рыбы использовали гранулированный корм Appens GROWER EF с размером гранулы 3–4,5 мм (Alltech Coppens, ФРГ), состав корма представлен в табл. 1.

Таблица 1. Состав комбикорма Appens GROWER EF (Alltech Coppens, ФРГ)

Table 1. Composition of compound feed Appens GROWER EF (Alltech Coppens, FRG)

Состав комбикорма	Компоненты	Витамины и добавки
Рыбная мука	Сырой протеин – 42 %	Витамин А – 10000 МЕ/кг
Соевый белковый концентрат	Сырой жир – 13 %	Витамин D ₃ – 2331 МЕ/кг
Пшеничная клейковина	Клетчатка – 2,7 %	Железо – 60 мг/кг
Пшеница	Зола – 9 %	Йод – 5 мг/кг
Рыбий жир	Фосфор – 1,39 %	Медь – 5 мг/кг
Кукурузная клейковина	Кальций – 1,6 %	Марганец – 20 мг/кг
Дрожжевые продукты		Цинк – 60 мг/кг
Рапсовое масло		

Кормление форели проводили с 8.00 до 22.00 ч в течение 10 мес. Суточная доза корма для особи форели возрастом от 2 до 10 мес. составляла в среднем 2 % от средней массы рыбы в соответствии с классическими методами содержания аквакультуры этого вида рыб [14].

Подготовку проб (гомогенизация, экстракция) комбикорма и тканей (белые мышцы) рыб возрастом 10 мес. выполняли методами классической липидологии [12]. Для определения содержания ЖК в экстрактах липидных фракций использовали метод газовой хроматографии с масс-спектрометрическим (ГХ-МС) и пламенно-ионизационным детектированием (ГХ-ПИД).

Получение метиловых эфиров жирных кислот. Определение содержания ЖК проводили в виде их метиловых эфиров (МЭЖК), полученных путем этерификации липидной фракции белых мышц. Для выделения общих липидов из навесок образцов тканей массой 0,3–0,7 г (точная навеска) применяли трехкратную экстракцию смесью Фолча (хлороформ-метанол = 2:1, об/об, 2 мл) в ультразвуковой ванне (10 мин). К объединенному экстракту добавляли воду до соотношения хлороформ – метанол – вода = 2 : 1: 1 (об/об) и оставляли на сутки при +4 °С. После центрифугирования (3000 g) отбирали нижний слой, сушили с безводным Na₂SO₄, переносили в предварительно взвешенную пробирку и концентрировали досуха в токе аргона. Количество общих липидов определяли гравиметрическим методом.

Для получения метиловых эфиров к полученной фракции липидов добавляли 0,6 мл 2 % -го раствора H₂SO₄ в MeOH и помещали в термостат при 75 °С на 2 ч. Реакционную смесь охлаждали до комнатной температуры, проводили трехкратную экстракцию *n*-гексаном (по 0,5 мл), экстракты объединяли и промывали дистиллиро-

ванной водой. После высушивания (Na_2SO_4) экстракты центрифугировали и использовали для анализа методами ГХ-МС и ГХ-ПВД.

Газовая хроматография с масс-спектрометрическим детектированием (ГХ-МС). Подготовленные образцы анализировали на хроматомасс-спектрометре Agilent GC 6890, MSD 5973N (Agilent, США) с колонкой Rxi®-5Sil MS(30 м × 0,25 мм × 0,25 мкм, Restek, США) в режиме программирования температуры от 120 до 240 °C со скоростью 5 °C/мин и от 240 до 300 °C со скоростью 5 °C/мин; изотерма 300 °C – 5 мин. Температура дозатора 250 °C; объем вводимой в колонку пробы 3 мкл в режиме без деления потока. Детектирование пиков МЭЖК проводили в режиме сканирования масс-спектра в диапазоне значений m/z 42–450.

Газовая хроматография с пламенно-ионизационным детектированием (ГХ-ПВД). Подготовленные образцы анализировали на газовом хроматографе Shimadzu GC-2010 Plus (Shimadzu, Япония) с колонкой GC Bp-5MS, 30 м × 0,25 мм × 0,25 мкм, Trajan Scientific) в режиме программирования температуры от 120 до 240 °C со скоростью 5 °C/мин и от 240 до 300 °C со скоростью 5 °C/мин; изотерма 300 °C – 5 мин. Температура дозатора 340 °C; температура детектора (ПВД) 340 °C; объем вводимой в колонку пробы 3 мкл в режиме без деления потока.

Идентификация пиков МЭЖК на хроматограммах проводилась по библиотеке масс-спектров Nist Mass Spectral Database с использованием программного обеспечения MS Search v. 1.7a (2000).

Оценка правильности. Для оценки систематической погрешности определения концентрации МЭЖК в мышцах рыб применяли метод добавок. В качестве добавки использовали образец рыбьего жира Fish Oil T14165QC (Supelco, Sigma-Aldrich Co. LLC, США) с установленными межлабораторно значениями содержаний ЖК. После гомогенизации образцов проб к двум параллельным навескам добавляли известное количество раствора добавки Fish Oil T14165QC и проводили экстракцию, метанолиз и ГХ-анализ, как описано выше.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа общего липидного и жирнокислотного состава используемого для кормления форели комбикорма представлены в табл. 2, 3.

Таблица 2. Содержание общих липидов комбикорма Appens GROWER EF (Alltech Coppens, ФРГ)

Table 2. Total lipid content of compound feed Appens GROWER EF (Alltech Coppens, FRG)

Показатели	Содержание общих липидов, % сухой массы
Общие липиды	22,16
Триацилглицерины	10,70
Фосфолипиды	6,16
Холестерин	3,93
Эфиры холестерина	1,37

Общий липидный состав комбикорма. Содержание общих липидов в количестве 22 % от сухой массы и выявленное соотношение групп общих липидов в исследованном корме позволяет сделать вывод о наличии необходимых составляющих для активного развития и роста форели, так как эти показатели близки к соответствующим показателям кормов, рекомендованных для аквакультуры [15]. Содержание липидной биомассы в большинстве кормов достигает 55–65 % жира, но сами корма значительно различаются по содержанию жирных кислот и соотношению типов кислот (НЖК/МНЖК/ПНЖК), что сказывается на росте и развитии выращиваемых рыб [11, 14].

Жирнокислотный состав комбикорма. В комбикорме Appens GROWER EF (Alltech Coppens, ФРГ) идентифицировано 32 ЖК, из них НЖК – 11, МНЖК – 7, ПНЖК – 14 (полный список идентифицированных кислот в статье не приводится). В табл. 3 показаны данные по содержанию доминирующих ЖК в используемом комбикорме и в мышцах радужной форели.

Таблица 3. Доминирующие жирные кислоты в мышцах радужной форели и комбикорме

Table 3. Dominant fatty acids in rainbow trout muscles and compound feed

Жирные кислоты	Жирные кислоты (ЖК) в мышцах, % суммы			Комби-корм
	1	2	3	
16:0	17,74	18,54	18,10	12,20
18:0	4,61	3,32	4,66	2,56
Сумма насыщенных ЖК	21,41	23,17	23,02	18,85
16:1 ω-7	3,57	2,82	2,90	3,23
18:1 ω-9	35,97	31,16	32,00	34,08
18:1 ω-11	2,17	1,82	2,05	–
20:1 ω-9	1,59	1,94	2,25	5,63
Сумма мононенасыщенных ЖК	56,48	41,44	42,71	49,48
18:3 ω-3	–	–	–	3,77
20:3 ω-3	0,83	1,22	0,97	0,24
20:5 ω-3 (ЭПК)	2,46	3,16	2,45	3,52
22:6 ω-3 (ДГК)	9,95	13,02	13,45	6,40
Сумма полиненасыщенных ЖК (ω-3)	13,79	18,02	17,18	13,93
18:2 ω-6	14,15	11,79	12,33	16,20
20:4 ω-6 (АРК)	1,25	1,65	1,38	0,43
Сумма полиненасыщенных ЖК (ω-6)	15,40	13,44	13,71	17,74
Сумма полиненасыщенных ЖК	29,19	31,46	30,89	31,67
Соотношение ω-6/ω-3	1,0:1,1	0,7:1,0	0,8:1,0	1,3:1,0

Насыщенные жирные кислоты (НЖК). Уровень НЖК комбикорма составил 18,9 %. НЖК являются энергетической основой в метаболизме рыб [12]. Показано, что в исследованном комбикорме среди НЖК доля пальмитиновой кислоты (16:0) составляла около 65 % от суммы НЖК (кислота характерна для растительных жиров, которые и входят в состав комбикормов). Второй по содержанию среди НЖК была стеариновая (18:0) кислота. Уровни других НЖК составляли менее 1 %.

Мононенасыщенные жирные кислоты (МНЖК). В комбикорме олеиновая кислота (18:1ω-9) занимает около 69 % от суммы МНЖК. На долю пальмитолеино-

вой (16:1 ω -7), вакценовой (18:1 ω -7) и гондоиновой (20:1 ω -9) кислот приходится более 15 % от суммы МНЖК. Содержание остальных исследованных МНЖК было менее 1 % от общей суммы ЖК. Характерной чертой жирнокислотного состава исследованного комбикорма является высокое содержание мононенасыщенных жирных кислот (С18:1 ω -9) – 56 %.

Полиненасыщенные жирные кислоты (ПНЖК) исследованного корма представлены семействами ω -3 и ω -6. Превалирующим компонентом среди ω -6 ПНЖК в изученном комбикорме была линолевая кислота (18:2 ω -6), ее доля среди ω -6 ПНЖК достигала 94 %. Уровень арахидоновой кислоты (20:4 ω -6) составил 1,4 % от общей суммы ПНЖК.

Наличие важных кислот линоленового ряда – эйкозапентаеновой (20:5 ω -3), докозапентаеновой (22:5 ω -3) и докозагексаеновой (22:6 ω -3) – соответствовало рекомендованному разработчиками кормов уровню, что свидетельствует о высоком качестве исследованного комбикорма, так как высокое содержание эйкозапентаеновой и докозагексаеновой кислот в кормах для радужной форели повышает темп роста рыб [2, 16].

Можно предположить, что при производстве этого корма в качестве источника липидной составляющей использовался в основном рыбий жир, в состав которого входят эйкозапентаеновая и докозагексаеновая кислоты. В последнее время в связи с ускоренными темпами развития аквакультуры рыбий жир является дефицитным и дорогостоящим. Чаще в комбикорме используют растительные масла и животные жиры, в которых либо нет арахидоновой, эйкозапентаеновой и докозагексаеновой кислот, либо эти кислоты присутствуют в малых количествах.

Среди незаменимых ЖК, которые поступают в организм рыб только с кормом, выявлен высокий уровень линоленовой кислоты.

Потребность в ω -3 ПНЖК и ω -6 ПНЖК у радужной форели может быть удовлетворена, если в составе корма присутствуют линоленовая и линолевая кислоты в достаточном количестве. Данный вид рыб обладает способностью трансформировать эти кислоты в длинноцепочечные с четырьмя–шестью двойными связями (эйкозапентаеновую, докозагексаеновую, арахидоновую и др.).

Дисбаланс в соотношении незаменимых жирных кислот – одна из главных причин снижения скорости роста рыб, ухудшения их физиологического состояния, жизнестойкости и адаптационных возможностей. При меньшем количестве ПНЖК в составе корма наблюдаются потеря аппетита, снижение скорости роста, ухудшение усвоения пищи у лососевых [2].

Незаменимые полиненасыщенные жирные кислоты участвуют в основных физиологических процессах и адаптациях рыб, влияя на жидкость биомембран и активность белков, в том числе ферментов [12].

Результаты исследований позволили сделать вывод, что состав корма Appens GROWER EF (Alltech Coppens, ФРГ) позволяет удовлетворить физиологическую потребность форели в незаменимых ω -3 и ω -6 ЖК. В дальнейшем, в связи с тем, что исследованные корма официально не поставляются, кормление рыб будет осуществляться аналогичными по составу отечественными комбикормами, например, Aller Bronze (Аквафид, Россия).

Жирнокислотный состав белых мышц. Проведено исследование жирнокислотного состава белых мышц радужной форели (3 особи). Идентифицировано

26 кислот, НЖК – 10, МНЖК – 8, ПНЖК – 8 (полный список идентифицированных кислот в статье не приводится).

Мышцы и внутренний жир являются основными тканями для запасания липидов у лососевых рыб, чем и был обусловлен выбор объекта исследования в данной работе. Содержание ЖК в корме и мышцах практически не отличалось по составу и соотношению кислот. Из корма в организм рыб поступают НЖК, МНЖК и ПНЖК. В организме животных, в том числе и рыб, НЖК и МНЖК входят в состав триацилглицеринов (ТАГ), используемых в качестве источников энергии, а ПНЖК в основном – в состав фосфолипидов, которые формируют биологические мембраны.

Насыщенные жирные кислоты. Уровень НЖК мышц составил 21–23 % от общей суммы кислот, идентифицированных в мышцах. Наблюдалось самое высокое содержание пальмитиновой (C16:0) и стеариновой (18:0) кислот, которые входят в состав комбикорма.

Мононенасыщенные жирные кислоты исследованных образцов представлены восемью кислотами, составляющими 41–46 % от общей суммы кислот, которые идентифицированы в мышцах рыб.

Основным представителем МНЖК была олеиновая (18:1 ω -9) кислота. Ее содержание в мышцах варьирует в диапазоне 31–35 %, что близко к ее содержанию в комбикорме (34 %). Также в мышцах исследованных рыб выявлено наличие в небольших количествах (табл. 3) других важных для организма человека МНЖК, таких как миристолеиновая (C14:1) и пальмитолеиновая (16:1 ω -7). На долю пальмитолеиновой (16:1 ω -7), вакценовой (18:1 ω -7) и гондоиновой (20:1 ω -9) кислот приходится более 15 % суммы МНЖК. Содержание остальных исследованных МНЖК было менее 1 % от суммы ЖК. Характерной чертой жирнокислотного состава исследованных мышц является высокое содержание олеиновой и пальмитолеиновой кислот (18:1 ω -9, C16:1 ω -7) – 56%.

Кислоты ω -9 могут быть синтезированы человеческим организмом из ненасыщенных ω -3 и ω -6 жирных кислот и, следовательно, не являются необходимыми в диете.

На развитие и рост радужной форели влияют входящие в состав липидов ПНЖК. Они играют важную роль в адаптации мембранных структур клеток экотермных организмов к изменениям условий внешней среды и выполняют ряд важных функций, например, являются предшественниками эйкозаноидов [17, 18]. Однако собственный синтез ПНЖК в организме рыб не восполняет их физиологически необходимое количество [3], поэтому для нормального развития радужной форели необходим высокий уровень длинноцепочечных ПНЖК семейства ω -3 (таких как эйкозапентаеновая 20:5 ω -3 и докозагексаеновая 22:6 ω -3 кислоты) в комбикорме, которые способствуют активному росту рыб [18]. Незаменимые ПНЖК семейства ω -6 представляла линолевая (18:2 ω -6) кислота.

Соотношение ω -3 и ω -6. ПНЖК исследованных образцов мышц рыб представлены семействами ω -3 и ω -6 в соотношении, практически равном 1:1.

По литературным данным, рекомендованное соотношение ω -3/ ω -6 изменялось со временем. Например, по рекомендации Роспотребнадзора, основанной на Методических рекомендациях МР 2.3.1.2432-08 (2009 г), соотношение ω -3/ ω -6 должно быть 5–10/1 [19]. Поздние документы, в том числе документы ВОЗ и России, рекомендуют более низкое соотношение ω -3/ ω -6 – не выше 2:1–3:1 [20]

Результаты исследований последних лет добавили новые данные в механизм действия этих соединений. Выявлено, что кислоты семейства ω -6 способны запускать болевые реакции, аллергию, процессы воспаления и повышение давления в сосудах, в то время как кислоты ряда ω -3 способствуют остановке этих процессов. Поэтому в качестве оптимального предлагается соотношение ω -3/ ω -6 1:1 [2–4, 11, 15, 16].

Основное значение для физиологических и биохимических процессов рыб имеют главным образом длинноцепочечные ПНЖК – арахидоновая (эйкозатетраеновая) кислота (20:4 ω -6, АРК), эйкозапентаеновая (20:5 ω -3, ЭПК) и докозагексаеновая (22:6 ω -3, ДГК). Результаты исследований показывают, что присутствие в корме ПНЖК способствует наличию этих кислот в мышцах. Таким образом, форель, выращиваемая в р. Ангаре, является прекрасным источником ЭПК и ДГК из семейства ω -3.

Особь *Parasalmo mykiss*, отобранные для исследования, содержались в садках при температуре воды от +12 до +15 °С в течение 10 мес. Оценка темпа роста радужной форели, который зависит от температуры воды, степени насыщения воды растворенным кислородом и полноценности применяемых кормов, была проведена на 30 особях, средний прирост которых составил 600 ± 50 г. Такое значение прироста рыб характерно для предприятия ООО НПО «Иркутская форель».

Рыбий жир является одним из известных лечебных натуральных жиров, где ЭПК и ДГК жирные кислоты обнаруживаются в значительных количествах. Преобладающей ω -3 жирной кислотой в мышцах форели была С22:6 ω -3 (докозагексаеновая кислота), как и у большинства пресноводных рыб. Среди группы ω -6 92 % составляла 18:2 ω -6 – эссенциальная линолевая кислота, предшественник ЭПК.

Важной особенностью состава ЖК исследованных образцов форели был уровень ненасыщенности липидов за счет содержания полиненасыщенной докозагексаеновой кислоты. Содержание длинноцепочечных высоконепредельных жирных кислот (эйкозапентаеновой 20:5 ω -3 и докозагексаеновой 22:6 ω -3) в мышцах рыб оказалось достаточно высоким при кормлении кормом Арpens GROWER EF. Так, у всех исследованных особей содержание эйкозапентаеновой кислоты 20:5 ω -3 находилось в пределах 2,4–3,2 %, а содержание докозагексаеновой кислоты колебалось от 9,5 до 13,5 % от общей суммы ЖК, т. е. при благоприятном температурном режиме уровень ПНЖК был достаточно высоким у рыб, получавших используемый корм. В условиях характерных для региона температур в р. Ангаре содержание эссенциальных кислот в мышцах форели сохраняется на оптимальном уровне. Определенные сочетания корма и температуры предохраняют организм рыб от потери ЭПК и ДГК.

Несмотря на то, что имеется много данных о жирнокислотном составе радужной форели, эти исследования необходимо продолжать, выявляя связь жирнокислотного состава корма и условий содержания аквакультуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При исследовании были получены данные о пуле жирных кислот в белых мышцах особей *Parasalmo mykiss*, содержащихся в садках прибрежной пелагиали р. Ангары, что позволяет оценить перспективы получения аквакультуры радужной форели с качественным мясом в условиях Восточной Сибири.

Кормам для рыб, содержащихся в искусственных условиях, необходимо уделять особое внимание, так как рыбы в зависимости от возраста по-разному реагируют на уровень липидов в кормах. Содержание жирных кислот в белых мышцах исследованных особей форели позволило охарактеризовать используемый состав корма как оптимальный для нормального роста и развития рыб.

У всех исследованных особей в белых мышцах выявлены близкие уровни и соотношение ЖК. Отмечено высокое содержание ПНЖК в мышцах с преобладанием физиологически значимой докозагексаеновой 22:6 ω -3 кислоты.

Полученные результаты могут быть использованы для оценки качества продукции садковой аквакультуры радужной форели с учетом особенностей водоемов Восточной Сибири и сбалансированных комбикормов фабричного производства для лососевых рыб. Результаты проведенных исследований могут быть использованы для разработки практических рекомендаций при составлении научного обоснования условий выращивания садковых аквакультур радужной форели в сибирских водоемах.

Работа выполнена на базе уникальной научной установки «Экспериментальный пресноводный аквариумный комплекс байкальских гидробионтов» ЛИН СО РАН и «Приборного центра коллективного пользования физико-химического ультрамикрoанализа ЛИН СО РАН (ЦКП «Ультрамикрoанализ») по теме №0279-2021-0005 «Исследование трансформаций состояния водоемов и водотоков Восточной Сибири в сезонных и долговременных аспектах в контексте изменений климата, геологической среды и антропогенных нагрузок».

Список источников

1. Влияние повышенной температуры на физиологическое состояние сиговых рыб (Coregonidae) при выращивании их в условиях аквакультуры / И. Н. Остроумова, В. В. Костюничев, А. А. Лютиков [и др.]. – DOI: 10.37663/0131-6184-2022-1-69-74 // Аквакультура и воспроизводство. Рыбное хозяйство. – 2022. – №1. – С. 69–74.
2. Оценка липидных показателей комбикормов для аквакультуры радужной форели в процессе хранения / Н. Н. Немова, О. Б. Васильева, Т. Р. Руоколайнен [и др.] // Кормопроизводство. – 2011. – № 3. – С. 44–47.
3. Fish oil replacement in rainbow trout diets and total dietary PUFA content: II) Effects on fatty acid metabolism and in vivo fatty acid bioconversion / T. Thanuthong, D. Francis, E. Manickam [et al.]. – DOI: 10.1016/j.aquaculture.2011.09.026 // Aquaculture. – 2011. – Vol. 322–323. – P 99–108.
4. Гладышев, М. И. Наземные источники полиненасыщенных жирных кислот для аквакультуры / М. И. Гладышев – DOI: 10.31857/S0042875221030048 // Вопросы ихтиологии. – 2021. – Т. 61. – № 4. – С. 471–485.
5. Шатуновский, М. И. Экологические закономерности обмена веществ морских рыб / М. И. Шатуновский. – Москва: Наука, 1980. – 288 с. – ISBN 978-5-8114-3341-4.

6. Особенности влияния гуминовых кислот на аквакультуру / Е. Ю. Закирова, А. М. Аймалетдинов, М. Н. Мансурова, Маланьева А. Г. – DOI: 10.36038/0131-6184-2025-4-120-128 // Рыбное хозяйство. – 2025. – Т. 1. – №. 4. – С. 120–128.
7. The biochemical ecology of marine fishes / Y. V. Natochin, M. V. Savina, G. E. Shulman, R. M. Love. – DOI: 10.1023/A:1012639928289 // Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology. – 2001. – Vol. 36. – P. 317–318.
8. Lloret, J. Condition and health indicators of exploited marine fishes / J. Lloret, G. E Shulman, R. M. Love. – Oxford: Wiley Blackwell, 2014. – 262 p. – ISBN 978-0-470-67024-8.
9. Болтачев, А. Р. Аналитический обзор современного состояния мирового рыболовства и аквакультуры / А. Р. Болтачев // Морской экологический журнал. – 2007. – Т. 6. – № 4. – С. 5–17.
10. Differences in composition and fatty acid contents of different rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) strains in similar and contrasting rearing conditions / M. I. Gladyshev, A. A. Makhrov, A. N. Sushchik [et al.] – DOI: 10.1016/j.aquaculture.2022.738265 // Aquaculture. – 2022. – Vol. 556. – P. 738265.
11. Влияние комбикормов различного состава на ростовые процессы радужной форели *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792) / О. Б. Васильева, М. А. Назарова, П. О. Рипатти, Н. Н. Немова. – DOI: 10.17076/eb245. // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2015. – № 11. – С. 99–108.
12. Sargent, J. R. The lipids / J. R. Sargent, D. R Tocher, J. G. Bell. – DOI: 10.1016/b978-012319652-1/50005-7. – Text: electronic // San Diego: Academic Press, 2002. – Chap. 4. Fish Nutrition. – P. 181–257. – URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1016/b978-012319652-1/50005-7?ysclid=mfc5q9sx710459424> (date of treatment: 29.08.2025).
13. Effects of dietary lipid levels on growth, feed utilization, body composition and antioxidant parameters of juvenile mud crab (*Scylla paramamosain*) / J. Zhao, X. B. Wen, S. K. Li [et al.]. – DOI: 10.1016/j.aquaculture.2014.09.018 // Aquaculture. – 2015. – Vol. 435. – P. 200–206.
14. Скларов, В. Я. Корма и кормление рыб в аквакультуре / В. Я. Скларов. – Москва: Изд-во ВНИРО, 2008. – 150 с. – ISBN 978-5-85382-357-0.
15. Васильева, О.Б. Ассимиляция экзогенных жирных кислот в тканях радужной форели *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792) в аквакультуре / О. Б. Васильева, М. А. Назарова, Н. Н. Немова. – DOI: 10.24143/2073-5529-2023-1-98-104 // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. – 2023. – № 1. – С. 98–104.
16. Назарова, М. А. Сезонные изменения липидного состава тканей радужной форели *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792) / М. А. Назарова, О. Б. Васильева, Н. Н. Немова – Текст: электронный // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. – 2017. – № 6 (167). – С. 12-20. – URL: <http://elibrary.petrso.ru/books/29859> (дата обращения: 29.08.2025).
17. Hochachka, P. W. Biochemical adaptation Mechanism and process in physiological evolution / P. W. Hochachka, G. N. Somero // New York: Oxford University Press, 2002. – 466 p.
18. Correlates of perceptual distortions in clinical and non-clinical populations using the Cardiff Anomalous Perceptions Scale (CAPS): associations with anxiety and depression and a revalidation using a representative population sample / V. Bell,

P. W. Halligan, K. Pugh [et al.]. – DOI: 10.1016/j.psychres.2011.05.025 // *Psychiatry Res.* – 2011. – Vol. 189 (3). – P. 451–457.

19. МР 2.3.1.2432-08. 2.3.1. Рациональное питание. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации. Методические рекомендации (утв. Роспотребнадзором 18.12.2008).

20. МР 2.3.1.0253-21. 2.3.1. Гигиена питания. Рациональное питание. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации. Методические рекомендации (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 22.07.2021).

References

1. The effect of increased temperature on physiological state of whitefish cultivated in aquaculture / I. N. Ostroumova, V. V. Kostyunichev, A. A. Lyutikov [et al.]. – DOI: 10.37663/0131-6184-2022-1-69-74 // *Fisheries.* – 2022. – Vol. 1. – P. 69–74.

2. Evaluation of lipid parameters of compound feeds for rainbow trout aquaculture during storage / N. N. Nemova, O. B. Vasilyeva, T. R. Ruokolainen [et al.] // *Feed production.* – 2011. – № 3. – P. 44–47.

3. Fish oil replacement in rainbow trout diets and total dietary PUFA content: II) Effects on fatty acid metabolism and in vivo fatty acid bioconversion / T. Thanuthong, D. Francis, E. Manickam [et al.]. – DOI: 10.1016/j.aquaculture.2011.09.026 // *Aquaculture.* – 2011. – Vol. 322–323. – P. 99–108.

4. Gladyshev, M. I. Land-based sources of polyunsaturated fatty acids for aquaculture / M. I. Gladyshev. – DOI: 10.31857/S0042875221030048 // *Questions of Ichthyology.* – 2021. – Vol. 61. – № 4. – P. 471–485.

5. Shatunovsky, M. I. Ecological patterns of metabolism of marine fish / M. I. Shatunovsky. – Moscow: Nauka, 1980. – 288 p. – ISBN 978-5-8114-3341-4.

6. Features of the influence of humic acids to aquaculture / E. Yu. Zakirova, A. M. Aimaletdinov, M. N. Mansurova, A. G. Malanyeva. – DOI: 10.36038/0131-6184-2025-4-120-128 // *Fisheries.* – 2025. – Vol. 1 (4). – P. 120–128.

7. Biochemical ecology of marine fishes / Y. V. Natochin, M. V. Savina, G. E. Shulman, R. M. Love. – DOI: 10.1023/A:1012639928289 // *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology.* – 2001. – Vol. 36. – P. 317–318.

8. Lloret, J. Condition and health indicators of exploited marine fishes / J. Lloret, G. E. Shulman, R. M. Love. – Oxford: Wiley Blackwell, 2014. – 262 p. – ISBN 978-0-470-67024-8.

9. Boltachev, A. R. Analytical review of the current state of world fisheries and aquaculture / A. R. Boltachev // *Marine Ecological Journal.* – 2007. – Vol. 6. – № 4. – P. 5–17.

10. Differences in composition and fatty acid contents of different rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) strains in similar and contrasting rearing conditions / M. I. Gladyshev, A. A. Makhrov, A. N. Sushchik [et al.] – DOI: 10.1016/j.aquaculture.2022.738265 // *Aquaculture.* – 2022. – Vol. 556. – P. 738265.

11. Effect of mixed feeds of different composition on growth processes of rainbow trout *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792) / O. B. Vasil'eva, M. A. Nazarova,

P. O. Ripatti, N. N. Nemova. – DOI: 10.17076/eb245 // Transactions of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2015. – № 11. – P. 99–108.

12. Sargent, J. R. The lipids / J. R. Sargent, D. R. Tocher, J. G. Bell. – DOI: 10.1016/b978-012319652-1/50005-7. – Text: electronic // San Diego: Academic Press, 2002. – Chap. 4. Fish Nutrition. – P. 181–257. – URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1016/b978-012319652-1/50005-7?ysclid=mfcdn5q9sx710459424> (date of treatment: 29.08.2025).

13. Effects of dietary lipid levels on growth, feed utilization, body composition and antioxidant parameters of juvenile mud crab (*Scylla paramamosain*) / J. Zhao, X. B. Wen, S. K. Li [et al.]. – DOI: 10.1016/j.aquaculture.2014.09.018 // Aquaculture. – 2015. – Vol. 435. – P. 200–206.

14. Sklyarov, V. Ya. Feed and feeding of fish in aquaculture / V. Ya. Sklyarov. – Moscow: VNIRO Publishing House, 2008. – 150 p. – ISBN 978-5-85382-357-0.

15. Vasil'eva, O. B. Assimilation of exogenous fatty acids in tissues of rainbow trout *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792) in aquaculture. / O. B. Vasil'eva, M. A. Nazarova, N. N. Nemova. – DOI: 10.24143/2073-5529-2023-1-98-104 // Vestnik of Astrakhan State Technical University. – 2023. – Vol. 1. – P. 98–104.

16. Nazarova, M. A. Seasonal changes in the lipid composition of tissues of rainbow trout *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792) / M. A. Nazarova, O. B. Vasil'eva, N. N. Nemova. – Text: electronic // Scientific notes of Petrozavodsk State University. – 2017. – № 6 (167). – P. 12–20. – URL: <http://elibrary.petsu.ru/books/29859> (date of treatment: 29.08.2025)

17. Hochachka, P. W. Biochemical adaptation Mechanism and process in physiological evolution / P. W. Hochachka, G. N. Somero // New York: Oxford University Press, 2002. – 466 p.

18. Correlates of perceptual distortions in clinical and non-clinical populations using the Cardiff Anomalous Perceptions Scale (CAPS): associations with anxiety and depression and a revalidation using a representative population sample / V. Bell, P. W. Halligan, K. Pugh [et al.]. – DOI: 10.1016/j.psychres.2011.05.025 // Psychiatry Res. – 2011. – Vol. 189 (3). – P. 451–457.

19. MR 2.3.1.2432-08. 2.3.1. Rational nutrition. Standards of physiological needs for energy and nutrients for various groups of the population of the Russian Federation. Guidelines (approved by Rospotrebnadzor on 18.12.2008).

20. MR 2.3.1.0253-21. 2.3.1. Nutrition hygiene. Rational nutrition. Standards of physiological needs for energy and nutrients for various groups of the population of the Russian Federation. Guidelines (approved by the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation on 22.07.2021).

Информация об авторах

Г. А. Федорова – кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории хроматографии

А. А. Никонова – кандидат химических наук, главный специалист лаборатории хроматографии

О. А. Белых – доктор биологических наук, профессор кафедры химии

О. Ю. Глызина – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, руководитель группы экспериментальной гидробиологии

Information about the authors

G. A. Fedorova – Candidate of Chemistry, Senior Researcher of the Chromatography Laboratory

A. A. Nikonova – Candidate of Chemistry, Chief Specialist of the Chromatography Laboratory

O. A. Belykh – Doctor of Biology, Professor of the Department of Chemistry

O. Yu. Glyzina – Candidate of Biology, Senior Researcher, experimental team leader hydrobiology

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article

The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 30.09.2025; одобрена после рецензирования 10.10.2025; принята к публикации 15.10.2025.

The article was submitted 30.09.2025; approved after reviewing 10.10.2025; accepted for publication 15.10.2025.

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Научная статья

УДК 664.951.81+595.383.1+639.28

DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-71-83

Исследование влияния промывки фарша электрохимически активированным раствором хлорида натрия и вида используемого эмульгатора на качество рыбных полуфабрикатов, обогащенных крилевым жиром

Анатолий Владимирович Андрюхин¹, Михаил Леонидович Винокур²✉, Владислав Артурович Галдукевич³, Илья Олегович Морозов⁴

^{1,2,3,4} Атлантический филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии («АтлантНИРО»), Калининград, Россия

¹ andryukhin@atlant.vniro.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6161-9099>

² vinokur@atlantniro.ru✉, <http://orcid.org/0000-0001-5406-0701>

³ v.galdukevich@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0622-5935>

⁴ morozov@atlant.vniro.ru

Аннотация. Пенетрационным и органолептическим методами установлены структурно-механические характеристики фарша, промытого ЭХА-раствором, после его обогащения предварительно эмульгированным крилевым жиром. Приведены сравнительные данные по потерям каротиноидов при термической обработке формованной пищевой продукции из промытого фарша для эмульсий крилевого жира на основе казеината натрия (КЭ), лецитина (ЛЭ) и их композиции (КЛЭ). Исследование образцов после варки выявило, что в результате термической обработки снижение потерь каротиноидов наблюдается во всех образцах, при этом наилучший эффект был достигнут для КЭ, где потери снижаются на 9,6 % в случае с непромытым фаршем и на 11,3 % в случае с фаршем, промытым ЭХА-раствором. Наиболее высокое значение предельного напряжения сдвига (ПНС) до замораживания отмечено для полуфабрикатов из фаршей, промытых ЭХА-раствором с внесением КЭ (6950 Па), однако при этом отмечалась достаточно крошливая консистенция. Наилучшее соотношение реологических и органолептических характеристик до замораживания наблюдалось в промытых фаршах с добавлением КЛЭ, при этом значение ПНС фарша, промытого ЭХА-раствором, составило 5000 Па, что превышало более чем в 2 раза аналогичный показатель в образцах непромытого фарша (2350 Па). После размораживания использование КЛЭ позволило сохранить необходимый уровень органолептических показателей сырых изделий – пластичность и отсутствие рассыпчатой структуры. Сделано предположение о том, что казеинат натрия, по всей видимости, способствует формированию устойчивых, достаточно вязких эмульсионных структур, у которых белковые оболочки масляных капель сами способны кополимеризоваться или механически переплетаться с основной миозиновой белковой сетью.

© Андрюхин А. В., Винокур М. Л., Галдукевич В. А., Морозов И. О., 2025

Ключевые слова: крилевый жир, каротиноиды, предельное напряжение сдвига, астаксантин, электрохимически активированный раствор, казеинат натрия, лецитин.

Для цитирования: Андриюхин А. В., Винокур М. Л., Галдукевич В. А., Морозов И. О. Исследование влияния промывки фарша электрохимически активированным раствором хлорида натрия и вида используемого эмульгатора на качество рыбных полуфабрикатов, обогащенных крилевым жиром // Известия КГТУ. 2025. № 79. С. 71–83. DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-71-83.

Original article

Study of the efficiency of washing minced fish with an electrically activated sodium chloride solution and the type of emulsifiers on the quality of fish semi-finished products enriched with krill oil

Anatoliy V. Andryukhin¹, Mikhail L. Vinokur²✉, Vladislav A. Galdukevich³, Il'ya O. Morozov⁴

^{1,2,3,4}Atlantic branch of Research Institute of Fisheries and Oceanography («AtlantNIRO»), Kaliningrad, Russia

¹ andryukhin@atlant.vniro.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6161-9099>

² vinokur@atlantniro.ru✉, <http://orcid.org/0000-0001-5406-0701>

³ v.galdukevich@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0622-5935>

⁴ morozov@atlant.vniro.ru

Abstract. The structural and mechanical characteristics of minced fish washed with an electrically activated sodium chloride solution after its enrichment with pre-emulsified krill oil have been determined using penetration and organoleptic methods. Comparative data are presented on carotenoid losses during heat treatment of molded food products from washed minced fish for krill oil emulsions based on sodium caseinate (CE), lecithin (LE) and their composition (CLE). The study of samples after cooking has showed that as a result of heat treatment, a decrease in carotenoid losses is observed in all samples, with the best effect achieved for CE. The highest value of the yield stress (YS) before freezing has been noted for semi-finished products made from minced fish washed with an electrically activated solution with the addition of CE (6950 Pa), however, a rather crumbly consistency has been noted. The best ratio of rheological and organoleptic characteristics before freezing has been observed in washed minced fish with the addition of CLE, while the YS of minced fish washed with an electrically activated solution is 5000 Pa, which is more than 2 times higher than the same indicator in samples of unwashed minced fish (2350 Pa). After defrosting, the use of CLE allowed maintaining the required level of organoleptic characteristics of raw products: plasticity and the absence of a crumbly structure. It has been suggested that sodium caseinate apparently promotes the formation of stable, fairly viscous emulsion structures in which the protein shells of oil droplets themselves are capable of copolymerizing or mechanically intertwining with the main myosin protein network.

Keywords: krill oil, carotenoids, yield stress, electrochemical activated solute, minced fish, sodium caseinate, lecithin.

For citation: Andriukhin A. V., Vinokur M. L., Galdukevich V. A., Morozov I. O. Study of the efficiency of washing minced fish with an electrically activated sodium chloride solution and the type of emulsifiers on the quality of fish semi-finished products enriched with krill oil. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2025;(79): 71–83. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-71-83.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день по критерию целевого назначения можно выделить следующие наиболее крупные сегменты мирового рынка крилевого жира: биологически активные добавки (препараты биологически активных добавок), употребляемые отдельно (не в составе пищевых продуктов) в виде капсул, таблеток или некапсулированных жидкостей; компоненты кормов для животных; компоненты пищевых продуктов; компоненты лекарств. При этом, несмотря на то, что около 70,2 % приходится на долю препаратов биологически активных добавок, следует отметить, что рост рынка, прогнозируемый до 2032 г., будет обусловлен также развитием трех других сегментов, занимающих приблизительно равные доли. Чтобы обеспечить более высокий потенциал продаж крилевого жира, в том числе в составе различных рыбных продуктов, ключевые предприятия строят свою политику на расширении линейки продуктов на основе фарша сурими или непромытого фарша тощих рыб [1–4].

Проведенные ранее исследования по разработке рецептур полуфабрикатов, обогащенных крилевым жиром, показали, что использование гидроколлоидов позволяет значительно снизить потери каротиноидов при термической обработке формованной продукции, обогащенной крилевым жиром [5, 6]. В настоящей статье будет рассмотрена возможность совершенствования технологии формованной рыбной продукции посредством улучшения функционально-технологических свойств фаршей и предварительного эмульсионного структурирования крилевого жира.

Имеются исследования, которые показывают, что для улучшения функциональных свойств фаршей эффективным может быть применение ЭХА-растворов, выступающих в качестве криопротекторов [7]. Л. В. Антиповой с соавторами сделан вывод о том, что использование слабощелочного католита из сыворотки крови способствует росту предельного напряжения сдвига, показателей вязкости и функционально-технологических свойств говяжье-свиного фарша. По мнению авторов, добавление католита со щелочным рН предположительно способствует формированию дисперсной системы с более развитой удельной поверхностью как жировых капель, так и глобулярных белковых образований, что в свою очередь приводит в итоге к увеличению числа формируемых коагуляционных связей и улучшению реологии фарша. Этим же эффектом, а также достаточной заряженностью белковых молекул обусловлено изменение влагосвязывающей способности этого же фарша после промывки анолитом [8]. Вышеуказанное объяснение в принципе не противоречит модели формирования структуры, предложенной для промытых рыбных фаршей и учитывающей роль ионов электролитов в процессе многоуровневого образования кластеров из молекул миозина.

Как показали результаты предварительных экспериментов со слабощелочным анолитом, приготовленным посредством электролиза хлорида натрия, при промывке им фарша тресковых рыб и улучшении влагоудерживающей способно-

сти к механическим нагрузкам и нагреванию у последних наблюдается такой недостаток, как значительное ухудшение пластичности вплоть до появления крошливости.

При обогащении такого фарша липидами особый интерес представляет рассмотрение возможности использования лецитина и казеината натрия как пищевых компонентов, обладающих одновременно пластифицирующими и эмульгирующими свойствами. В работах Сюэи Чжун [9] отмечается также синергетическое действие указанных компонентов с точки зрения стабильности образуемых ими эмульсий. Показано, что смесь казеината натрия и лецитина приводит к образованию капель эмульсий, которые значительно мельче и распределяются более компактно, чем при использовании только казеината натрия или лецитина. При этом другими исследователями отмечается повышенная способность фосфолипидов и белков образовывать стабильные коллоидные структуры через взаимодействие друг с другом, обусловленное образованием водородных связей и гидрофобных сил [10, 11].

Таким образом, перспективным направлением развития технологии формирования полуфабрикатов, обогащенных крилевым жиром, может быть применение промывания фаршевых систем ЭХА-раствором хлорида натрия (далее ЭХА-раствором) совместно с предварительным структурированием фосфолипидами и казеинатом натрия в качестве со-эмульгаторов и структурообразующих агентов.

Целью настоящей статьи является установление влияния вида эмульгатора на казеиново-лецитиновой основе и промывки анолитом из электрически активированного раствора хлорида натрия на реологические свойства и степень потерь каротиноидов в рыбных полуфабрикатах, обогащенных крилевым жиром при их термической обработке.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом для исследования явился непромытый и промытый ЭХА-растворами фарш из тощей рыбы (треска атлантическая – *Gadus morhua*), полученный измельчением мышечной ткани. В промытый и непромытый фарши вносили пищевую соль в количестве 1,5 %. Использовался крилевый жир, произведенный норвежской компанией Aker BioMarine. Как показали результаты предварительных исследований, содержание каротиноидов в пересчете на астаксантин составило 198 мкг/г. По показателям значений кислотного (0,3 мг КОН/г жира) и перекисного чисел (0,5 мэкв акт кислорода/кг жира) крилевый жир соответствовал требованиям ТР ТС 021/2011.

Рыбный фарш подвергали промывке ЭХА-раствором (нейтральный анолит), приготовленным на установке СТЭЛ-40 при силе тока 10–12 А и pH 7,3–7,9 из подсоленной (5–9 г NaCl) на 1 л питьевой воды в течение 10 мин при соотношении фарша и воды 1:3. Концентрацию активного хлора C_{ax} (мг/л) определяли согласно рекомендациям по применению дезинфицирующего раствора «Нейтральный анолит АНК», вырабатываемого на установках типа СТЭЛ [12]. Значение C_{ax} составило 100 мг/л.

Для приготовления эмульсии были использованы казеинат натрия (ГОСТ 33920), вносимый в виде 4 %-го раствора, лецитин подсолнечный (ГОСТ 32052), композиции вышеуказанных компонентов.

Крилевый жир вносили в рыбный фарш в виде эмульсии с лецитином, казеином натрия и их композицией. Для получения эмульсии и фаршевых смесей в течение 10 мин использовали перемешивающее устройство лопастного типа – кухонный блендер (РНВ 1467 AL, погружной блендер Polaris), снабженный соответствующей насадкой. Рыбные шарики формовали вручную с весом одного шарика 8–10 г. Количество вносимой эмульсии крилевого жира составляло 5 % от массы полуфабриката и было рассчитано исходя из суточной потребности в астаксантине (4 мг).

Рыбные формованные полуфабрикаты замораживали воздушным способом в стеллажном морозильном аппарате при температуре минус 36 °С и глазировали посредством погружения в воду при 0 °С. Образцы размораживали и подвергали кулинарной обработке на пару в пароварке в течение 10 мин. Перед последующими исследованиями полуфабрикаты обтирали и протирали сверху бумажной салфеткой.

Реологические свойства сырых рыбных полуфабрикатов оценивали по предельному напряжению сдвига (ПНС). В качестве реометра применялся пенетрометр (типа КП-3) с константой конуса с углом при вершине 60°, $K = 2,14$ Н/кг. Методика определения числа пенетрации и ПНС основана на измерении погружения конуса при действии постоянной нагрузки в течение 180 сек в специально подготовленный образец.

По полученным данным глубины погружения определяли величину ПНС по формуле (1):

$$Q = \frac{k \times m}{h^2}, \quad (1)$$

где Q – предельное напряжение сдвига, Па; m – действительная величина нагрузки, кг; h – глубина погружения конуса, м; k – константа конуса с углом при вершине 60°, $k = 2,14$ Н / кг.

Содержание каротиноидов в пересчете на астаксантин определяли спектрофотометрически. Для этого 0,10–0,50 г жира растворяли в 25 мл гексана и вычисляли оптическую плотность на спектрофотометре СФ-2000 при длине волны 470 нм, калибровку проводили с использованием стандарта астаксантина. Выделение жира из исследуемых образцов рыбных формованных полуфабрикатов осуществляли бинарной смесью хлороформа и этилового спирта после предварительного высушивания сульфатом натрия. Соотношение спирта к хлороформу в бинарной смеси составляло 1:2.

Органолептическую оценку проводили в соответствии с требованиями ГОСТ ISO 6658 описательным методом, включающим следующие характеристики: формуемость (способность приобретать форму под действием приложенного давления), липкость (способность к адгезии), рассыпчатость / крошливость, пластичность (способность изменять и сохранять форму в результате деформации).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование реологических свойств формованных изделий выявило значительное увеличение прочностных свойств полуфабрикатов в результате промывания ЭХА-раствором, выраженное в увеличении значения ПНС. Так, ПНС для непромытого фарша без добавок составляло 4050 Па, после промывки – 6200 Па. Таким образом, образцы продукции, промытые ЭХА-раствором, становились более

плотными, что, вероятно, связано с уменьшением фракции водорастворимых белков, которая была отмечена в более ранних работах [7], однако там также наблюдалось снижение способности фарша к формованию. Одновременно после промывки ухудшались органолептические характеристики полуфабрикатов, в частности, промывка фарша приводила к появлению в продукте «крошливой» консистенции.

Наиболее высокое значение ПНС до замораживания отмечено для полуфабрикатов из фаршей, промытых ЭХА-раствором с внесением КЭ (6950 Па). Внесение ЛЭ в рецептуру привело к снижению ПНС, при этом фаршевая смесь становилась более пластичной. Данный факт, вероятно, связан с тем, что фосфолипиды, обладая амфифильной природой, при механическом воздействии (перемешивании) способствуют эмульгированию, что приводит к вторичному структурообразованию, в котором они, выступая в качестве связующей среды, способствуют уменьшению величины ПНС и повышению пластичности [13].

Наилучшее соотношение реологических и органолептических характеристик до замораживания наблюдалось в промытых фаршах с добавлением КЛЭ, при этом значение ПНС фарша, промытого ЭХА-раствором, составило 5000 Па, что превышало более чем в 2 раза аналогичный показатель в образцах непромытого фарша (2350 Па). У образцов отмечалась некрошливая пластичная консистенция.

После размораживания значение ПНС всех образцов существенно снизилось, причем наиболее заметное снижение произошло в образцах с добавлением 20 % лецитина и казеина (47,0 % и 49,0 % для образцов из промытого и непромытого фарша соответственно), что, вероятно, связано с частичным разрушением эмульсий кристаллами льда.

В целом, как показали полученные результаты проведенных исследований, промывка ЭХА-раствором позволяет сохранить значение ПНС на более высоком уровне относительно непромытых образцов и, как следствие, плотную структуру формованных полуфабрикатов.

Добавление смеси лецитина и казеината натрия позволило после размораживания сохранить необходимые органолептические показатели, пластичность, отсутствие рассыпчатой структуры, в то время как полуфабрикаты из промытого фарша без добавления эмульгаторов характеризовались крошливой консистенцией, а после внесения КЭ становились ломкими.

Исследование образцов после варки выявило, что в результате термической обработки во всех образцах происходит снижение потерь каротиноидов в сравнении с ранее полученными результатами (более 60 %) [5], при этом наилучший эффект был достигнут при использовании КЭ.

Таблица 1. Результаты исследования предельного напряжения сдвига и органолептических характеристик сырых рыбных полуфабрикатов
Table 1. Results of the study of the yield stress and organoleptic characteristics of raw semi-final products

№	Образец	До замораживания		После замораживания (размороженные)	
		Органолептическая характеристика	ПНС, Па	Органолептическая характеристика	ПНС, Па
1	Непромытый фарш	Формуется, не липкий, не рассыпается, непластичный	4050±200	Держит форму, слегка рассыпается при давлении	3200±200
2	Непромытый фарш + смесь: жир криля + казеинат натрия (лецитин 0 %)	Формуется, не липкий, слегка рассыпается, пластичный	4650±300	Держит форму, не рассыпается	3850±200
3	Непромытый фарш + смесь: жир криля + казеинат натрия + лецитин 20 %	Формуется, не липкий, мягкий («пластилин»), пластичный	2350±150	Держит форму, пластичный, разлом при давлении	1200±100
4	Непромытый фарш + смесь: жир криля + лецитин 20 % (казеинат натрия 0 %)	Формуется, не липкий, мягкий, слегка рассыпается, пластичный	2650±150	Держит форму, пластичный, не рассыпается	1640±100
5	Промытый фарш	Формуется плохо, рассыпается, крошливый	6200±300	Держит форму, плотный, крошливый	3700±200
6	Промытый фарш + смесь: жир криля + казеинат натрия (лецитин 0 %)	Формуется, слегка рассыпается, крошливый, непластичный	6950±400	Держит форму, плотный, разлом при давлении	5400±300
7	Промытый фарш + смесь: жир криля + казеинат натрия + лецитин 20 %	Формуется, слегка рассыпается, некрошливый, пластичный	5000±300	Держит форму, пластичный, некрошливый	2650±150
8	Промытый фарш + смесь: жир криля + лецитин 20 % (казеинат натрия 0 %)	Формуется, слегка рассыпается, слегка крошливый, пластичный	4750±200	Держит форму, пластичный, некрошливый	4450±200

Внесение крилевого жира или его смеси с лецитином в виде гелеподобной эмульсии казеината натрия, вероятно, позволяет сформировать гелевую структуру, способную равномерно распределяться в свободном пространстве микроструктуры фарша, формируя сеть, где жир в виде капель заполняет пустоты между белковыми молекулами фарша. Казеинат натрия, по все видимости, способствует формированию устойчивых, достаточно вязких эмульсионных структур, у которых белковые

оболочки масляных капель сами способны кополимеризоваться или механически переплетаться с основной миозиновой белковой сетью.

Таблица 2. Влияние промывки ЭХА-раствором, типа используемого эмульгатора на потери каротиноидов и влаги при термической обработке рыбных полуфабрикатов, обогащенных крилевым жиром

Table 2. Effect of washing with electrochemically activated solution and the type of emulsifier used on the loss of carotenoids and moisture during heat treatment of semi-final fish products enriched with krill oil

№	Образец	Потери каротиноидов, %	Потери влаги, %
1	Непромытый фарш	—	8,5±0,4
2	Непромытый фарш + смесь: жир криля + казеинат натрия (лецитин 0 %)	18,7±0,3	9,9±0,5
3	Непромытый фарш + смесь: жир криля + казеинат натрия + лецитин 20 %	28,3±0,4	10,7±0,6
4	Непромытый фарш + смесь: жир криля + лецитин 20 % (казеинат натрия 0 %)	30,2±0,5	9,0±0,5
5	Промытый фарш	—	7,8±0,4
6	Промытый фарш + смесь: жир криля + казеинат натрия (лецитин 0 %)	15,3±0,3	8,8±0,5
7	Промытый фарш + смесь: жир криля + казеинат натрия + лецитин 20 %	26,6±0,4	10,3±0,6
8	Промытый фарш + смесь: жир криля + лецитин 20 % (казеинат натрия 0 %)	28,6±0,4	8,4±0,4

Также отмечено, что максимальные потери каротиноидов (около 30 %) наблюдались в образцах из непромытого фарша с добавлением лецитина в количестве 20 % без казеината натрия, при этом влагосодержание данных образцов снизилось менее значительно относительно образцов с добавлением указанного структурообразователя. В работе Yinyin L. [14] указывается на зависимость между содержанием жира и стойкостью эмульсии, выражаемую в снижении способности эмульгирования при увеличении содержания жира. Предполагается, что в результате повышения доли жировой фракции, вызываемой внесением лецитина, происходит рост размера капель жира эмульсии, в результате чего капли не в состоянии в полной мере заполнить свободное пространство микроструктуры фарша и сформировать прочный белково-липидный каркас, что приводит к потерям жира и, как следствие, каротиноидов. Кроме того, с увеличением жировой фазы могут агрегироваться крупные масляные кластеры, снижающие однородность геля. Также уменьшается степень его химического сродства по отношению к белкам, в том числе обусловленная невысокой стабильностью при термических нагрузках [15]. Таким образом, подтверждается высказанное ранее предположение [5] о том, что потери каротиноидов при варке связаны в значительной степени не с их термической деструкцией, а с отделением масляной (жировой) фазы, в которой растворены каротиноиды.

В образцах полуфабрикатов из промытого ЭХА-раствором фарша наблюдались более низкие потери каротиноидов и влаги во всех исследуемых образцах, что

свидетельствует о более прочном связывании масляной фазы с белками промытого ЭХА-раствором фарша. Данный факт, вероятно, вызван структурными свойствами фарша, промытого ЭХА-раствором, в котором количество пустот между белковыми молекулами фарша превалирует по сравнению с непромытым фаршем ввиду более низкого содержания водорастворимых белков, теряемых в результате промывки, и, соответственно, формирования новой микроструктуры фарша, отличной от исходной, характеризующейся большей неоднородностью, которая заполняется эмульгированным жиром с формированием прочного белково-липидного каркаса. Также не исключена роль фактора адгезии солерастворимых белков к масляной фазе, улучшающейся после промывки ЭХА-раствором.

Полученные данные также свидетельствуют о том, что внесение казеината натрия способствует снижению потери каротиноидов и влаги относительно полуфабрикатов с лецитином, что, вероятно, связано с эффектом удерживания свободной воды за счет образования белково-жировой эмульсии гелеобразного типа. Кроме того, повышение сохранности каротиноидов на 9,6 % в случае с непромытым фаршем и на 11,3 % в случае с фаршем, промытым ЭХА-раствором, вызвано структурой жира, вносимого в виде эмульсии. Данное предположение подтверждается тем, что в фарше, промытом ЭХА-раствором, сохранность жировой фракции выше, это достигается за счет наличия больших пустот в микроструктуре, в которых более крупные капли жировой фракции распределяются легче, чем в непромытом фарше.

ВЫВОДЫ

Внесение фосфолипидов и казеината натрия совместно с предварительным промыванием фарша ЭХА-раствором позволяет сохранить необходимые реологические и органолептические показатели формованной пищевой рыбной продукции (полуфабрикатов) из трески с добавлением крилевого жира. Комбинации добавок, включающие лецитин, проявляли пластифицирующий эффект, что выражалось в снижении ПНС сырых образцов от 6950 ± 400 Па до значений менее 5000 Па. Промывка фарша ЭХА-раствором позволяет сохранить прочность продукта, которая снижается в результате замораживания и последующего размораживания полуфабрикатов для дальнейшей кулинарной обработки, а совместное комбинирование фосфолипидов и казеината натрия в процессе формования полуфабрикатов придает продукту пластичную, некрошливую консистенцию.

Использование казеината натрия в качестве эмульгатора приводит к снижению потери каротиноидов и влаги в процессе термической обработки за счет формирования жиросодержащего гелевого каркаса, способного эффективно связываться с микроструктурой фарша. Максимальные потери каротиноидов (около 30 %) наблюдались в образцах из непромытого фарша с добавлением лецитина в количестве 20 % без казеината натрия. Разница в потерях влаги между образцами была гораздо менее значительной и колебалась в пределах 8–11 % от ее начального содержания.

Промывка фарша ЭХА-раствором позволяет образовать микроструктуру, формирующую прочный белково-липидный каркас, возникающий за счет неоднородности и размера пустот, которые позволяют в более полной мере распределять капли жировой фракции.

Список источников

1. Андрюхин, А. В. Совершенствование технологии комплексной переработки антарктического криля (*Euphausia superba*) / А. В. Андрюхин, М. П. Андреев, В. А. Галдукевич. – DOI: 10.46845/1997-3071-2022-64-67-80 // Известия КГТУ. – 2022. – № 64. – С. 67–80.
2. Kwantes, J. M. Brief review of krill oil history, research, and the commercial market / J. M. Kwantes, O. A. Grundmann. – DOI: 10.3109/19390211.2014.902000 // Journal of Dietary Supplements. – 2015. – Vol. 12, № 1. – P. 23–25.
3. Cappell, I. R. Research funding and economic aspects of the Antarctic krill fishery / I. R. Cappell, G. MacFadyen, A. Constable. – DOI:10.1016/j.marpol.2022.105200 // Mar. Policy. – 2022. – Vol. 143. – P. 105200.
4. Antarctic krill (*Euphausia superba*) oil: a comprehensive review of chemical composition, extraction technologies, health benefits, and current applications / Dan Xie, Mengyue Gong, Wei Wei [et al.]. – DOI: 10.1111/1541-4337.12427 // Comprehensive Reviews in food science and food safety. – 2019. – Vol. 18, № 2. – P. 514–534.
5. Использование пищевых добавок для снижения потерь каротиноидов в рыбных полуфабрикатах, обогащенных крилевым жиром / М. Л. Винокур, А. В. Андрюхин, В. А. Галдукевич [и др.]. – DOI: 10.46845/1997-3071-2024-74-92-105 // Известия КГТУ. – 2024. – № 74. – С. 92–105.
6. О проблемах потерь при термической обработке формованных полуфабрикатов, обогащенных жиром антарктического криля / И. О. Морозов, В. А. Галдукевич, М. Л. Винокур, А. В. Андрюхин // Материалы I Международной научно-практической конференции «Рыбохозяйственный комплекс России: проблемы и перспективы развития» (28–29 марта 2023 г., Москва) / ФГБНУ «ВНИРО». – Москва: Изд-во ФГБНУ «ВНИРО», 2023. – С. 363–367.
7. Андреев, М. П. Характеристика фарша балтийской трески (*Gadus Morhua Callarias*), промытого электрохимически активированной водой с различной концентрацией ионов активного хлора / М. П. Андреев, В. А. Галдукевич. – DOI: 10.20914/2310-1202-2020-1-117-123 // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2020. – Т. 82, № 1 (83). – С. 117–123.
8. Физическая модель образования коагуляционных контактов в фарше с добавкой электрохимически активированной плазмы крови / Л. В. Антипова, С. А. Титов, Н. М. Ильина [и др.] // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2011. – № 1 (319). – С. 10–12.
9. Xue, J. Thyme oil nanoemulsions coemulsified by sodium caseinate and lecithin / J. Xue, Q. Zhong. – DOI: 10.1021/jf5034366 // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2014. – Vol. 62. – P. 9900–9907.
10. Edible Pickering emulsion stabilized by protein fibrils: Part 2. Effect of dipalmitoylphosphatidylcholine (DPPC) / Z. Gao, Y. Huang, X. Yao [et al.]. – DOI: 10.1016/j.foodhyd.2017.03.028 // Food hydrocolloids. – 2017. – Vol. 71. – P. 245–251.
11. Heat Deterioration of Phospholipids. II. Isolation and Identification of New Thermally Deteriorated Products from Soybean Lecithin / R. Sono, S. Sakamoto, N. Hamaguchi [et al.]. – DOI: 10.5650/jos.51.191 // Journal of Oleo Science. – 2002. – Vol. 51 (3). – P. 191–202.

12. Методические указания по применению нейтрального анолита АНК, вырабатываемого в установке СТЭЛ-10Н-120-01, для целей дезинфекции, предстерилизационной очистки и стерилизации. – Москва, 1997. – 16 с.

13. Дубинец, Е. А. Реология: конспект лекций / Е. А. Дубинец. – Керчь: Изд-во ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2020. – 82 с.

14. Antarctic krill (*Euphausia superba*) oil high internal phase emulsions improved the lipid quality and gel properties of surimi gel / Yinyin Lv, Xiaosong Sun, Hui Jia [et al.]. – DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.136352 // Food Chemistry. – 2023. – Vol. 423. – P. 136352.

15. Physicochemical and emulsifying properties of mussel water-soluble proteins as affected by lecithin concentration / H. Zou, N. Zhao, S. Li [et al.]. – DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2020.06.225 // International Journal of Biological Macromolecules. – 2020. – Vol. 163. – P. 180–189.

References

1. Andryukhin, A. V. Improving the technology of antarctic krill (*Euphausia superba*) complex processing / A. V. Andryukhin, M. P. Andreev, V. A. Galdukevich. – DOI: 10.46845/1997-3071-2022-64-67-80 // KSTU News. – 2022. – № 64. – P. 67–80.

2. Kwantes, J. M. Brief review of krill oil history, research, and the commercial market / J. M. Kwantes, O. A. Grundmann. – DOI: 10.3109/19390211.2014.902000 // Journal of Dietary Supplements. – 2015. – Vol. 12, № 1. – P. 23–25.

3. Cappell, I. R. Research funding and economic aspects of the Antarctic krill fishery / I. R. Cappell, G. MacFadyen, A. Constable. – DOI: 10.1016/j.marpol.2022.105200 // Mar. Policy. – 2022. – Vol. 143. – P. 105200.

4. Antarctic krill (*Euphausia superba*) oil: a comprehensive review of chemical composition, extraction technologies, health benefits, and current applications / Dan Xie, Mengyue Gong, Wei Wei [et al.]. – DOI: 10.1111/1541-4337.12427 // Comprehensive Reviews in food science and food safety. – 2019. – Vol. 18, № 2. – P. 514–534.

5. Use of food additives to reduce carotenoid losses in semi-finished fish products enriched with krill oil / M. L. Vinokur, A. V. Andryukhin, V. A. Galdukevich [et al.]. – DOI: 10.46845/1997-3071-2024-74-92-105 // KSTU News. – 2024. – № 74. – P. 92–105.

6. On the problems of losses during heat treatment of molded semi-finished products enriched with Antarctic krill oil / I. O. Morozov, V. A. Galdukevich, M. L. Vinokur, A. V. Andryukhin // Proceedings of the I International Scientific and Practical Conference "Fisheries Complex of Russia: Problems and Development Prospects" (March 28-29, 2023, Moscow) / Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography "VNIRO". – Moscow: Publishing house of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography "VNIRO", 2023. – P. 363–367.

7. Andreev, M. P. Characteristics of Baltic cod mince (*Gadus Morhua* Callarias) washed with electrochemically activated water with different concentrations of active chlorine ions / M. P. Andreev, V. A. Galdukevich. – DOI: 10.20914/2310-1202-2020-1-117-123 // Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. – 2020. – Vol. 82, № 1 (83). – P. 117–123.

8. Physical model of formation of coagulation contacts in mince with addition of electrochemically activated blood plasma / L. V. Antipova, S. A. Titov, N. M. Ilyina [et

al.] // News of higher educational institutions. Food technology. – 2011. – № 1 (319). – P. 10–12.

9. Xue, J. Thyme oil nanoemulsions coemulsified by sodium caseinate and lecithin / J. Xue, Q. Zhong. – DOI: 10.1021/jf5034366 // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2014. – Vol. 62. – P. 9900–9907.

10. Edible Pickering emulsion stabilized by protein fibrils: Part 2. Effect of dipalmitoylphosphatidylcholine (DPPC) / Z. Gao, Y. Huang, X. Yao [et al.]. – DOI: 10.1016/j.foodhyd.2017.03.028 // Food hydrocolloids. – 2017. – Vol. 71. – P. 245–251.

11. Heat Deterioration of Phospholipids. II. Isolation and Identification of New Thermally Deteriorated Products from Soybean Lecithin / R. Sono, S. Sakamoto, N. Hamaguchi [et al.]. – DOI: 10.5650/jos.51.191 // Journal of Oleo Science. – 2002. – Vol. 51 (3). – P. 191–202.

12. Guidelines for the use of neutral anolyte ANK, produced in the STEL-10N-120-01 unit, for the purposes of disinfection, pre-sterilization cleaning and sterilization. – Moscow, 1997. – 16 p.

13. Dubinets, E. A. Rheology: lecture notes / E. A. Dubinets. – Kerch: Publishing house of Kerch State Marine Technological University, 2020. – 82 p.

14. Antarctic krill (*Euphausia superba*) oil high internal phase emulsions improved the lipid quality and gel properties of surimi gel / Yinyin Lv, Xiaosong Sun, Hui Jia [et al.]. – DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.136352 // Food Chemistry. – 2023. – Vol. 423. – P. 136352.

15. Physicochemical and emulsifying properties of mussel water-soluble proteins as affected by lecithin concentration / H. Zou, N. Zhao, S. Li [et al.]. – DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2020.06.225 // International Journal of Biological Macromolecules. – 2020. – Vol. 163. – P. 180–189.

Информация об авторах

А. В. Андрюхин – кандидат технических наук, руководитель центра переработки водных биологических ресурсов, заведующий лабораторией стандартизации и нормирования

М. Л. Винокур – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории стандартизации и нормирования, доцент кафедры технологии продуктов питания

В. А. Галдукевич – кандидат технических наук, ведущий инженер лаборатории стандартизации и нормирования

И. О. Морозов – кандидат технических наук, ведущий инженер лаборатории стандартизации и нормирования

Information about the authors

A. V. Andriukhin – Candidate of Technical sciences, Head of the Center for Processing Aquatic Biological Resources, Head of the laboratory of standardization and regulation

M. L. Vinokur – Candidate of Technical sciences, Head researcher of the laboratory of standardization and regulation, Associate Professor of the Department of Food Products Technology

V. A. Galdukevich – Candidate of Technical sciences, Leading engineer at the laboratory of standardization and regulation

I. O. Morozov – Candidate of Technical sciences, Leading engineer of the laboratory of standardization and regulation

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 25.08.2025; одобрена после рецензирования 27.08.2025; принята к публикации 01.09.2025.

The article was submitted 25.08.2025; approved after reviewing 27.08.2025; accepted for publication 01.09.2025.

Научная статья

УДК 664.346

DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-84-98

Эмульсионный соус, обогащенный продуктами переработки вторичного сырья лососевых рыб, стабилизированный растительными компонентами

Александр Викторович Миленький¹, Светлана Викторовна Агафонова²

^{1,2}Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

¹flame_007@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-7243-5791>

²svetlana.agafonova@klgtu.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-5992-414X>

Аннотация. Майонезная продукция пользуется большим спросом среди населения России, а ее рынок демонстрирует устойчивый рост в течение последнего десятилетия. В соответствии с современными трендами на здоровое питание среди потребителей существует запрос на низкокалорийную продукцию, обогащенную полезными нутриентами. Поскольку майонезы и майонезные соусы содержат большое количество жира, основным направлением разработки продуктов здорового питания является изменение жирнокислотного состава соусов, обеспечение баланса жирных кислот за счет повышения содержания омега-3. Для этих целей может применяться рыбный жир, вводимый в качестве замены традиционных растительных масел. Целью работы явилась разработка эмульсионного соуса кардиопротекторной направленности со сбалансированным жирнокислотным составом, стабилизированного растительными компонентами. С помощью метода математического моделирования для соуса оптимизирована рецептура, установлены оптимальные дозировки в его составе растительных компонентов (морковного пюре и пюре из черной смородины). Морковное пюре в количестве 10,4 % от массы готового продукта и 16,7 % пюре из черной смородины обеспечивают стабильность эмульсии на основе подсолнечного масла и рыбного жира и благоприятные вкусоароматические свойства соуса. Описаны органолептические и физико-химические показатели качества соуса, который представляет собой однородный сметанообразный продукт фиолетового цвета, с отчетливыми рыбным и ягодно-овощным вкусом и запахом. В составе разработанного продукта содержится 43,72 % жира, что соответствует жирности продуктов категории майонезных соусов. В течение 30 суток в продукте не отмечается рост количества дрожжей, плесеней, бактерий группы кишечной палочки, КМАФАнМ не превышает 15 КОЕ/г. Соус характеризуется пониженной калорийностью в сравнении с классическими майонезами, является источником кардиопротекторных компонентов – омега-3 жирных кислот, лецитина.

Ключевые слова: рыбный жир, эмульсионный соус, лецитин, черная смородина.

Для цитирования: Миленький А. В., Агафонова С. В. Эмульсионный соус, обогащенный продуктами переработки вторичного сырья лососевых рыб, стабилизированный растительными компонентами // Известия КГТУ. 2025. № 79. С. 84–98. DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-84-98.

Original article

Emulsion sauce enriched with products of processing of salmon fish waste and stabilized with vegetable components

Aleksandr V. Milenkiy¹, Svetlana V. Agafonova²

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

¹flame_007@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-7243-5791>

²svetlana.agafonova@klgtu.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-5992-414X>

Abstract. Mayonnaise products are in great demand among the Russian population, and the mayonnaise market has been showing steady growth over the past decade. In accordance with current trends in healthy eating, consumers are asking for low-calorie products enriched with healthy nutrients. Since mayonnaise and mayonnaise sauces contain a large amount of oil, the main direction of developing healthy food products is to change the fatty acid composition of sauces and ensure a balance of fatty acids by increasing the omega-3 content. For these purposes, fish oil can be used, introduced as a substitute for traditional vegetable oils. The aim of the work was to develop a cardioprotective emulsion sauce with a balanced fatty acid composition, stabilized with plant components. Using the mathematical modeling method, the recipe for the sauce has been optimized, optimal dosages of vegetable components (carrot puree and blackcurrant puree) have been established in its composition. Carrot puree in the amount of 10.4 % by weight of the finished product and blackcurrant puree 16.7% ensure the stability of the emulsion based on sunflower oil and fish oil and the favorable flavor and aromatic properties of the sauce. The organoleptic and physico-chemical quality parameters of the sauce have been described, which is a homogeneous sour cream-like product of purple color, with a distinct fish and berry-vegetable flavor and odor. The developed product contains 43.72% fat, which corresponds to the fat content of products in the category of mayonnaise sauces. During 30 days, there has been no increase in the amount of yeast, molds, and E. coli bacteria in the product, and QMAFAnM has not exceeded 15 CFU/g. The sauce is characterized by a lower calorie content in comparison with classic mayonnaise, it is a source of cardioprotective components: omega-3 fatty acids, lecithin.

Key words: fish oil, emulsion sauce, lecithin, blackcurrant

For citation: Milenkiy A. V., Agafonova S. V. Emulsion sauce enriched with products of processing of salmon fish waste and stabilized with vegetable components. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2025;(79):84–98. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-84-98.

ВВЕДЕНИЕ

Майонез представляет собой традиционный эмульсионный соус, получаемый путем смешивания растительных масел (преимущественно подсолнечного, оливкового или рапсового) с яичным желтком, горчицей, уксусом или лимонным соком и различными вкусоароматическими добавками [1]. Российский рынок майонезов является одним из крупнейших в мире. В 2023 г. объем производства составил около 870 тыс. т, что на 7 % превышало показатели предыдущего года [2]. Как отмечают эксперты BuisnesStat, рынок демонстрирует устойчивый рост на протяжении последнего десятилетия, несмотря на экономические колебания. Среднедушевое потребление майонеза в России составляет 4,3–4,8 кг в год, что значительно превышает аналогичные показатели в европейских странах [2, 3].

Особенностью российского рынка остается преобладание традиционных высококалорийных майонезов, хотя в последние три года отмечается значительный рост спроса на более легкие варианты – майонезные соусы с пониженной жирностью. Еще одним актуальным направлением расширения ассортимента такой продукции является разработка обогащенных соусов специализированного назначения, содержащих эссенциальные для человека компоненты [3, 4].

Сердечно-сосудистые заболевания, оставаясь основной причиной смертности в глобальном масштабе, стимулируют активный поиск инновационных решений в области пищевых технологий. Особое внимание исследователей привлекает модификация традиционных продуктов питания, в частности майонезов, с целью придания им функциональных свойств, способствующих профилактике сердечно-сосудистых патологий. Научные разработки в этой области представляют собой комплексный подход, сочетающий оптимизацию жирнокислотного состава, обогащение биологически активными компонентами и применение передовых технологий производства [5].

Традиционно используемые в производстве эмульсионных соусов растительные масла, такие как подсолнечное, характеризуются высоким содержанием омега-6 жирных кислот, что при избыточном потреблении может способствовать развитию метаболических нарушений. В связи с этим активно изучаются альтернативные источники жиров с более сбалансированным составом. Например, частичная замена подсолнечного масла льняным, как показано в исследованиях, опубликованных в ACS Omega, позволяет значительно увеличить долю α -линоленовой кислоты (омега-3) в конечном продукте. При замене 50 % подсолнечного масла содержание этой жирной кислоты достигает 15 % от общего количества липидов, что оказывает положительное влияние на липидный профиль потребителей и снижает риск атеросклеротических изменений [1]. Аналогичный эффект наблюдается при использовании масла авокадо, которое благодаря высокому содержанию олеиновой кислоты и фитостеролов способствует снижению уровня «плохого» холестерина на 12–15 % при регулярном употреблении, при этом полностью сохраняя привычные вкусовые качества продукта [6]. Не менее перспективным направлением является включение в состав продукта длинноцепочечных омега-3 жирных кислот из морских источников. Современные методы микрокапсулирования с использованием комбинации казеина и мальтодекстрина решают проблему характерного рыбного привкуса, позволяя достичь содержания эйкозапентаеновой (ЭПК) и докозагексаеновой (ДГК) кислот до 300 мг на 100 г продукта. Клинические наблю-

дения подтверждают, что систематическое потребление такого обогащенного майонеза приводит к улучшению показателей липидного обмена [7]. Среди источников омега-3 жирных кислот наибольший интерес представляют жиры рыб семейства лососевых, сельдевых, скумбриевых. Именно эти жиры содержат большое количество ЭПК и ДГК, проявляющих кардиопротекторное действие [8, 9].

Компонентом липидной природы, актуальность применения которого в составе эмульсионных соусов обусловлена не только пользой для здоровья человека, но технологической функцией, является соевый лецитин – натуральная смесь фосфолипидов, получаемых из масла соевых бобов. Регулярное потребление соевого лецитина способствует нормализации липидного обмена, снижению уровня общего холестерина и липопротеинов низкой плотности, улучшению эластичности сосудов и препятствует образованию холестериновых бляшек. Кроме того, соевый лецитин обладает стабилизирующим действием на пищевые эмульсии, поэтому его использование способствует получению продукта со стойкой при хранении консистенцией [10].

Параллельно с модификацией жирового компонента ведутся работы по обогащению майонезов биологически активными веществами. Особый интерес в этом контексте представляют фитостеролы, пищевые волокна, витамины и антиоксиданты растительного сырья [11]. Помимо благоприятного воздействия на здоровье человека, компоненты растительного сырья также могут играть роль стабилизаторов, антиокислителей в составе жировых эмульсий, улучшать вкус и аромат продукта. Например, применение растворимых пищевых волокон, таких как пектин или каррагинан, для стабилизации эмульсий позволяет уменьшить долю липидов до 50 % без существенного ущерба для органолептических характеристик, а использование натуральных экстрактов растений (розмарин, гвоздика, шалфей) позволяет снизить интенсификацию окислительных процессов липидов продукта в процессе его хранения [12–15].

Целью настоящего исследования явилась разработка эмульсионного соуса кардиопротекторной направленности со сбалансированным жирнокислотным составом, стабилизированного растительными компонентами. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: определение оптимальных количеств растительных компонентов (пюре из черной смородины и моркови) в рецептуре соуса, установление органолептических характеристик эмульсионного соуса, химического состава и физико-химических показателей качества готовой продукции, исследование хранимостпособности эмульсионного соуса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объектов исследования выступали образцы эмульсионного соуса, изготовленного на основе подсолнечного масла, с добавлением лососевого жира, гидролизата рыбного белка, пюре из черной смородины и морковного пюре, соевого лецитина, яичного меланжа, вкусовых добавок и СО₂-экстракта гвоздики.

Рыбный жир и гидролизат рыбного белка получали из вторичного сырья семги (*Salmo salar*) при его комплексной переработке биотехнологическим методом. Метод заключался в гидролизе сырья протеолитическим ферментным препаратом для разрушения жировых клеток и дальнейшем отделении жира центрифугированием. Подробно процесс ферментализации рыбного сырья описан в работе [16],

массовая доля рыбного жира в составе жировой фракции соуса установлена в предыдущих исследованиях [17].

Комплекс растительных добавок включал пюре из черной смородины и морковное пюре, соевый лецитин, CO₂-экстракт гвоздики. Пюре из черной смородины и морковное пюре получали при измельчении растительного сырья. Пюре из черной смородины уваривали до содержания сухих веществ не менее 10 %. Для обогащения соуса использовали соевый лецитин, предоставленный ООО УК «Содружество», и CO₂-экстракт гвоздики от ООО «Компания Караван». Вводимый в состав эмульсионного соуса комплекс растительных добавок обогащает его такими компонентами, как витамины, антиоксиданты, полифенолы, пищевые волокна, а также способствует стабилизации эмульсии и сохранению качества и безопасности готового продукта [18–20]. В обеспечении стабильности эмульсии и требуемых реологических характеристик готового продукта существенная роль принадлежит пюре из черной смородины и морковному пюре как компонентам, богатым пектиновыми веществами и основным источникам влаги в продукте. В связи с этим оптимальные дозировки пюре из черной смородины и морковного пюре устанавливали методом математического моделирования согласно ортогональному центральному композиционному плану (ОЦКП) второго порядка. Частный отклик «эффективная вязкость (В)» определяли при этом с помощью ротационного вискозиметра Брукфильда, частный отклик «органолептическая оценка (О)» – на основании ГОСТ 31761-2012 «Майонезы и соусы майонезные. Общие технические условия», ГОСТ ISO 6658-2016 «Органолептический анализ. Методология. Общее руководство». Органолептическая оценка включала определение внешнего вида, запаха, вкуса и послевкусия продукта. В качестве «идеального» значения частного отклика «эффективная вязкость» был принят показатель соуса промышленного производства (16000 сПз).

Общий химический состав, физико-химические показатели качества и стойкость эмульсии соуса определяли согласно ГОСТ 31762-2012 «Майонезы и соусы майонезные. Правила приемки и методы испытаний».

План микробиологических испытаний был разработан на основании МУК 4.2.1847-04. 4.2. «Методы контроля. Биологические и микробиологические факторы. Санитарно-эпидемиологическая оценка обоснования сроков годности и условий хранения пищевых продуктов. Методические указания», в соответствии с которыми ориентировочный срок годности эмульсионного соуса установлен на уровне 90 суток. Для испытаний были приготовлены 3 образца продукции: № 1 – эмульсионный соус по классической рецептуре; № 2 – эмульсионный соус по классической рецептуре, обогащенный рыбным жиром, белковым гидролизатом, морковным пюре, соевым лецитином, с внесением CO₂-экстракта гвоздики; № 3 – эмульсионный соус по рецептуре второго образца, дополнительно обогащенный пюре из черной смородины. Образцы хранились при температуре 2–5 °С в стеклянных банках цилиндрической формы объемом 250 см³ с металлической крышкой «твист-офф». Количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ) определяли в соответствии с ГОСТ 10444.15-94, количество бактерий группы кишечной палочки (БГКП), колиформы – ГОСТ 31747-2012, количество дрожжей и плесневых грибов – ГОСТ 10444.12-2013.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 представлены изменяемые факторы, их предельные значения и интервалы варьирования при оптимизации рецептуры эмульсионного соуса.

Таблица 1. Изменяемые факторы, их интервалы и предельные значения
Table 1. Variable factors, their intervals and limit values

Факторы	Уровни			Интервал варьирования
	–1	0	+1	
$\omega_{\text{чс}}$ – массовая доля пюре из черной смородины, %	10	15	20	5
$\omega_{\text{мп}}$ – массовая доля морковного пюре, %	5	10	15	5

Реализация эксперимента позволила получить значения обобщенных параметров оптимизации, объединяющих частные отклики, значения которых представлены в табл. 2.

Таблица 2. План эксперимента по моделированию и оптимизации рецептуры эмульсионного соуса

Table 2. Experimental plan for modeling and optimizing the formulation of emulsion sauce

№	Условия опытов				Результаты реализации		Обобщенный параметр оптимизации
	$\omega_{\text{чс}}$		$\omega_{\text{мп}}$		О, балл	В, сПз	
	Код.	Нат., %	Код.	Нат., %			
1	1	20	1	15	42,0	12700	0,068
2	−1	10	1	15	42,0	9100	0,211
3	1	20	−1	5	43,1	22400	0,179
4	−1	10	−1	5	43,6	21800	0,148
5	1	20	0	10	44,3	18500	0,037
6	−1	10	0	10	42,1	11200	0,115
7	0	15	1	15	42,4	14100	0,037
8	0	15	−1	5	43,7	17100	0,021
9	0	15	0	10	42,4	14600	0,031

Преобразование представленных в табл. 2 значений согласно алгоритму ОЦКП позволило получить модель рецептуры эмульсионного соуса в кодированном, а затем в натуральном выражении (1, 2).

$$y = 0,05 \cdot x_1^2 + 0,1 \cdot x_2^2 - 0,043 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,032 \cdot x_1 - 0,005 \cdot x_2 - 0,024 \quad (1)$$

$$y = 0,002 \cdot M_1^2 + 0,004 \cdot M_2^2 - 0,002 \cdot M_1 \cdot M_2 - 0,05 \cdot M_1 - 0,053 \cdot M_2 + 0,66, \quad (2)$$

где: y – обобщенный параметр оптимизации;

M_1 – массовая доля пюре из черной смородины в соусе, %;

M_2 – массовая доля морковного пюре в соусе, %.

Расчетные оптимальные значения дозировок составили 16,7 % для пюре из черной смородины и 10,4 % для морковного пюре. Графическая интерпретация

модели рецептуры эмульсионного соуса, наглядно демонстрирующая оптимальные значения факторов, представлена на рис. 1.

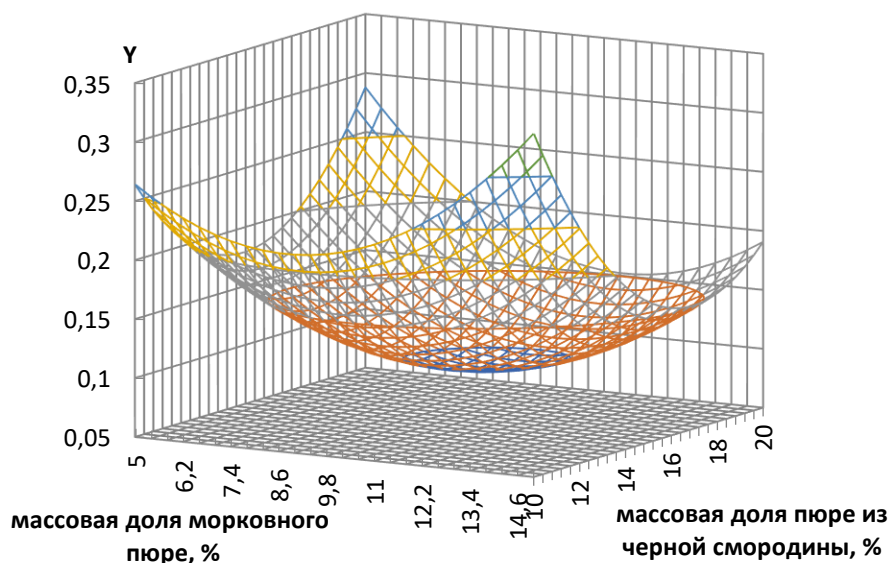


Рис. 1. Графическая интерпретация модели рецептуры эмульсионного соуса
Fig. 1. Graphical interpretation of the emulsion sauce formulation model

Готовый соус представляет собой однородный сметанообразный продукт фиолетового цвета, с отчетливыми рыбным и ягодно-овощным вкусом и запахом. Органолептические характеристики соуса показаны в табл. 3, профиль вкуса – на рис. 2.

Таблица 3. Органолептические характеристики эмульсионного соуса
Table 3. Organoleptic characteristics of the emulsion sauce

Наименование показателя	Характеристика продукта
Внешний вид, консистенция	Однородный сметанообразный продукт; допускаются единичные пузырьки воздуха, слегка тянущаяся и желеобразная консистенция, наличие включений в случае внесения измельченных вкусо-ароматических добавок, в том числе натуральных, в соответствии с техническим документом на эмульсионный продукт конкретного наименования
Вкус и запах	Вкус кисловатый, с запахом и вкусом, свойственным сырью, ощутимый запах рыбного сырья и гвоздики, без посторонних привкусов и запахов
Цвет	От фиолетового до ярко-розового, насыщенный, однородный по всей массе, допускается менее насыщенный цвет, но однородный по всей массе

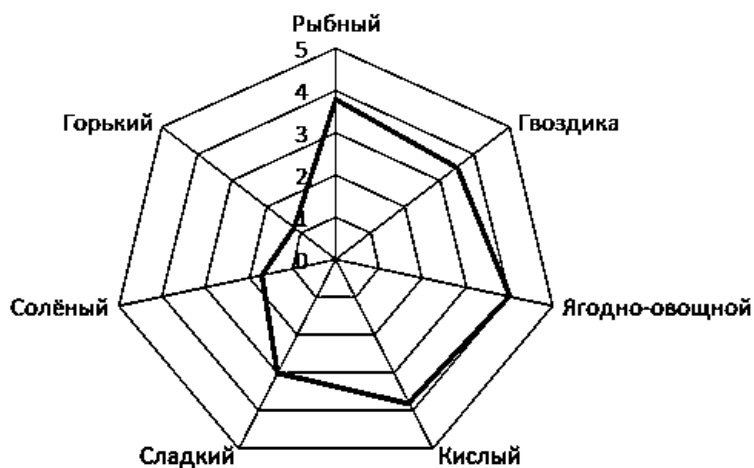


Рис. 2. Профиль вкуса эмульсионного соуса
Fig. 2. The flavor profile of the emulsion sauce

Во вкусовом профиле эмульсионного соуса доминируют ягодно-овощные и кислые ноты, что обусловлено включением черной смородины и моркови в состав. Выраженный рыбный вкус формируется благодаря использованию лососевого жира и гидролизата, что придает соусу характерные рыбные оттенки. Вкусовая нота гвоздики обусловлена применением CO_2 -экстракта, который способствует раскрытию и усилению аромата, добавляя сложность и глубину вкусовому восприятию продукта. Благодаря сбалансированному кисло-сладкому вкусу с ярким рыбным оттенком соус может использоваться как дополнение к рыбным блюдам, а также как заправка к нейтральным по вкусу блюдам, например, овощным салатам.

Общий химический состав и физико-химические показатели качества продукта представлены в табл. 4. В классической рецептуре майонеза была снижена массовая доля жира, при этом часть подсолнечного масла заменена на лососевый жир. За счет внесения пюре из черной смородины получена стабильная при испытании по стандартной методике эмульсия.

Таблица 4. Общий химический состав и физико-химические показатели качества эмульсионного соуса, %

Table 4. General chemical composition and physico-chemical quality indicators of emulsion sauce, %

Показатель	Значение
Массовая доля жира	43,72±2,2
Массовая доля влаги	34,79±1,7
Массовая доля белка	13,05±0,3
Массовая доля золы	0,78±0,04
Массовая доля углеводов*	7,66
Кислотность, % в пересчете на уксусную кислоту, не более	0,38±0,02
Стойкость эмульсии, процент неразрушенной эмульсии, не менее	99

Примечание*: Значение получено расчетным путем

При изучении хранимостпособности образцов эмульсионного соуса было установлено, что образцы не сохраняют стабильность на протяжении ориентировочного срока хранения 90 суток. В первых двух образцах наблюдалось расслоение эмульсии по прошествии 22-х суток хранения, в третьем – по прошествии 30 суток, в связи с чем испытания были остановлены. Такая нестабильность продукции связана прежде всего с техническими особенностями процесса изготовления соуса в лабораторных условиях. Микробиологические показатели образцов соусов представлены в табл. 5.

Таблица 5. Микробиологические показатели образцов соусов в процессе хранения
Table 5. Microbiological parameters of sauce samples during storage

Образец	Контрольные точки испытаний	Микробиологические показатели			
		КМАФАнМ, КОЕ/г	БГКП	Плесени, КОЕ/г	Дрожжи, КОЕ/г
№ 1	0 (фон)	$4,0 \cdot 10^2$	Отсутствие в 0,1 г	Менее 5	Менее 5
	14 суток	Менее 15	Отсутствие в 0,1 г	Менее 5	Менее 5
	22 сутки	Менее 15	Отсутствие в 0,1 г	Менее 5	Менее 5
№ 2	0 (фон)	$2,0 \cdot 10^3$	Отсутствие в 0,1 г	Менее 5	Менее 5
	14 суток	$2,0 \cdot 10^2$	Отсутствие в 0,1 г	Менее 5	$3,5 \cdot 10^2$
	22 сутки	$5,0 \cdot 10^2$	Отсутствие в 0,1 г	Менее 5	Менее 5
№ 3	0 (фон)	Менее 15	Отсутствие в 0,1 г	Менее 5	Менее 5
	14 сутки	Менее 15	Отсутствие в 0,1 г	Менее 5	Менее 5
	22 сутки	Менее 15	Отсутствие в 0,1 г	Менее 5	Менее 5
	30 сутки	Менее 15	Отсутствие в 0,1 г	Менее 5	Менее 5

Как видно из табл. 5, во всех образцах в процессе хранения не отмечалось роста содержания БГКП и плесеней, практически не наблюдалось роста количества дрожжей, за исключением одной точки (14 суток хранения образца № 2). Стоит отметить более высокую микробиологическую обсемененность образца эмульсионного соуса № 2 в сравнении с контрольным образцом № 1, связанную с использованием обогащающих добавок.

Динамика роста КМАФАнМ в течение 22-х суток хранения представлена на рис. 3.

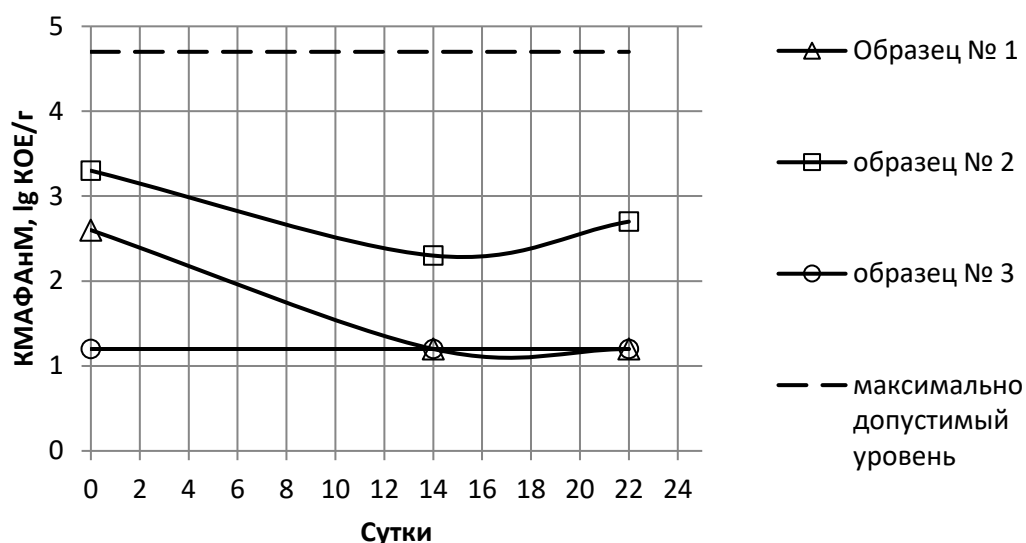


Рис. 3. Динамика роста КМАФАнМ (lg КОЕ/г) образцов эмульсионного соуса в процессе хранения

Fig. 3. Growth dynamics of QMAFAnM (lg CFU/g) of emulsion sauce samples during storage

Было установлено, что внесение пюре из черной смородины (образец № 3) снижает общую микробиологическую обсемененность эмульсионного соуса, которая увеличивается при использовании других обогащающих добавок. Это связано с высоким содержанием в черной смородине природных антимикробных веществ, к которым относятся органические кислоты, флавоноиды, антоцианы. Кроме этого, внесение пюре из черной смородины за счет высокого содержания пектиновых веществ обеспечивает стабилизацию эмульсионной системы на более длительный срок в сравнении с другими образцами.

Исходя из данных, полученных в ходе микробиологических испытаний, установлен рекомендуемый срок хранения эмульсионного соуса в течение 30 суток при температуре 2–5 °С.

Расчетным путем установлено, что в одной порции эмульсионного соуса (40 г) содержится в среднем 240 мг суммы ЭПК и ДГК, что приближается практически к 100 % суточной потребности взрослого человека в этих жирных кислотах (250 мг в соответствии с МР 2.3.1.0253-21). Содержание лецитина находится на уровне 3,2 г, что составляет 45 % от его суточной потребности. Таким образом, по содержанию ЭПК и ДГК, соевого лецитина продукт относится к функциональным продуктам в соответствии с ГОСТ Р 54059-2010. Продукт также является источником витаминов, антиоксидантов, пищевых волокон за счет вносимого растительного сырья.

ВЫВОДЫ

Разработана рецептура эмульсионного соуса на основе подсолнечного масла, обогащенного лососевым жиром, гидролизатом рыбного белка и растительными компонентами (морковным пюре, пюре из черной смородины, соевым леци-

тином). Установлены оптимальные дозировки морковное пюре и черной смородины на уровне 10,4 и 16,7 % от массы готового продукта соответственно.

Готовый соус представляет собой однородный сметанообразный продукт фиолетового цвета, с отчетливыми рыбным и ягодно-овощным вкусом и запахом. Содержание жира в соусе (43,72 %) соответствует жирности продуктов категории майонезных соусов. Рекомендуемый срок хранения соуса составляет 30 суток при температуре 2–5 °С.

Разработанный эмульсионный соус может быть рекомендован для регулярного употребления детям дошкольного и школьного возраста, студентам, а также всем категориям взрослого населения в качестве натурального источника полезных жиров, витаминов и фосфолипидов. Данный продукт представляет особую ценность для лиц, находящихся в группе риска по развитию сердечно-сосудистых патологий.

Список источников

1. Omega-3-Enriched and Oxidative Stable Mayonnaise Formulated with Spray-Dried Microcapsules of Chia and Fish Oil Blends / M. A. Rahim, M. Imran, F. A. Khan [et al.]. – DOI: 10.1021/acsomega.3c08807 // ACS Omega. – 2024. – Vol. 9. – P. 8221–8228.
2. Анализ рынка майонеза и майонезных соусов в России в 2019–2023 гг., прогноз на 2024–2028 гг. – Текст: электронный // BuisnesStat: сайт. – URL: <https://businessstat.ru/catalog/id7838/> (дата обращения: 01.02.2025).
3. Российский рынок майонезов в 2023 году. – Текст: электронный // BuisnesStat: сайт. – URL: <https://businessstat.ru/news/mayonnaise/> (дата обращения: 24.02.2025).
4. Global Functional Food Market Analysis 2023. – Текст: электронный // FoodTech Analytics: сайт. – URL: <https://foodtech-analytics.com/reports> (дата обращения: 01.02.2025).
5. Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ). – Текст: электронный // Всемирная организация здравоохранения: сайт. – URL: [https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds)) (дата обращения: 10.11.2025).
6. A novel mayonnaise-type dressing added with avocado pulp and oil as health ingredients processed with ultrasound / R. I. Guzmán-Gerónimo, R. Mendoza-López, Y. Cocotle-Ronzón [et al.]. – DOI: 10.1080/19476337.2022.2051606 // Journal of Food. – 2022. – Vol. 20 (1). – P. 60–65.
7. Development of Fish Oil-Loaded Microcapsules Containing Whey Protein Hydrolysate as Film-Forming Material for Fortification of Low-Fat Mayonnaise / N. E. Rahmani-Manglano, I. González-Sánchez, P. J. García-Moreno [et al.]. – DOI: 10.3390/foods9050545 // Foods. – 2020. – Vol. 9 (5). – P. 545.
8. Advances in Therapeutic Applications of Fish Oil: A review / P. Das, A. Dutta, T. Panchali [et al.]. – DOI: 10.1016/j.meafao.2024.100142 // Measurement Food. – 2024. – Vol. 13. – P. 100–142.
9. Evaluation of the balance of oils from fish by-products / S. V. Agafonova, O. Y. Mezenova, V. V. Volkov, A. I. Rykov. – DOI: 10.1088/1755-1315/689/1/ 012027 //

IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Kaliningrad, 2020. – Kaliningrad. – 2021. – P. 12–27.

10. Lecithin and cardiovascular health: a comprehensive review / M. O. Onaolapo, O. D. Alabi, O. P. Akano [et al.]. – DOI: 10.1186/s43044-024-00523-0 // Egypt Heart J. – 2024. – Vol. 76 (1). – P. 92.

11. Ghosh, B. A Review On Phytosterol (Ps) Enriched Mayonnaise / B. Ghosh, I. Bhowmik, S. Dey. – DOI: 10.53555/jaz.v44iS5.3295 // Journal of Advanced Zoology. – 2023. – Vol. 44 (S5). – P. 2624–2629.

12. Возможности применения двойных эмульсий в пищевой промышленности. Часть 2: Формирование пищевых систем нового формата / У. Багале, И. В. Калинин, Н. В. Науменко [и др.] – DOI: 10.14529/food230103 // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2023. – № 1. – С. 27–34.

13. Меренкова, С. П. Анализ реологических свойств овощных и майонезных соусов, выработанных с применением функциональных растительных добавок / С. П. Меренкова, А. А. Лукин // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. – 2015. – № 4. – С. 96–105.

14. Агафонова, С. В. Антиоксидантная активность СО₂-экстрактов некоторых растений и перспективы их использования в технологии пищевых рыбных жиров / С. В. Агафонова, Л. С. Байдалинова // Вестник Международной академии холода. – 2015. – № 2. – С. 13–17.

15. Kumar, Y. Ultrasonication of mayonnaise formulated with xanthan and guar gums: Rheological modeling, effects on optical properties and emulsion stability / Y. Kumar. – DOI: 10.1016/j.lwt.2021.111632 // LWT – Food Science and Technology. – 2021. – Vol. 149. – Article 111632.

16. Миленький, А. В. Получение гидролизата из вторичного сырья семги методами ферментативного и термического гидролиза / А. В. Миленький, С. В. Агафонова, Е. А. Агафонов // Материалы XII Международного Балтийского морского форума (Калининград, 30 сентября – 04 октября 2024 г.) / Калинингр. гос. техн. ун-т. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2024. – С. 147–153.

17. Миленький, А. В. Исследования по технологии эмульсионного соуса повышенной биологической ценности / А. В. Миленький, С. В. Агафонова. – DOI: 10.46845/2541-8254-2023-3(40)-51-51 // Вестник молодежной науки. – 2023. – № 3 (40). – С. 14.

18. Synergistic Effects of Natural Product Combinations in Protecting the Endothelium Against Cardiovascular Risk Factors / M. Yousaf, V. Razmovski-Naumovski, M. Zubair [et al.]. – DOI: 10.1177/2515690X221113327 // Journal of Evidence-Based Integrative Medicine. – 2022. – Vol. 27. – P. 328–347.

19. Bioactive Compounds and Health Benefits of Carrot / N. Rafiq, N. Gupta, S. Gupta, D. P. Kour // Indian Farmer. – 2022. – Vol. 9 (11). – P. 506–510.

20. Polyphenol-rich extract from blackcurrant pomace attenuates the intestinal tract and serum lipid changes induced by a high-fat diet in rabbits / A. Jurgoński, J. Juśkiewicz, Z. Zduńczyk [et al.]. – DOI: 10.1007/s00394-014-0665-4 // Eur. J. Nutr. – 2014. – Vol. 53 (8). – P. 1603–1613.

References

1. Omega-3-Enriched and Oxidative Stable Mayonnaise Formulated with Spray-Dried Microcapsules of Chia and Fish Oil Blends / M. A. Rahim, M. Imran, F. A. Khan [et al.]. – DOI: 10.1021/acsomega.3c08807 // ACS Omega. – 2024. – Vol. 9. – P. 8221–8228.
2. Market analysis of mayonnaise and mayonnaise sauces in Russia in 2019–2023, forecast for 2024–2028. – Text: electronic // BuisnesStat: site. – URL: <https://businesstat.ru/catalog/id7838/> (date of treatment: 01.02.2025).
3. The Russian mayonnaise market in 2023. – Text: electronic // BuisnesStat: site. – URL: <https://businesstat.ru/news/mayonnaise/> (date of treatment: 24.02.2025).
4. Global Functional Food Market Analysis 2023. – Text: electronic // FoodTech Analytics: site. – URL: <https://foodtech-analytics.com/reports> (date of treatment: 01.02.2025).
5. Cardiovascular diseases (CVD). – Text: electronic // World Health Organization: site. – URL: [https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds)) (date of treatment: 10.11.2025).
6. A novel mayonnaise-type dressing added with avocado pulp and oil as health ingredients processed with ultrasound / R. I. Guzmán-Gerónimo, R. Mendoza-López, Y. Cocotle-Ronzón [et al.]. – DOI: 10.1080/19476337.2022.2051606 // Journal of Food. – 2022. – Vol. 20 (1). – P. 60–65.
7. Development of Fish Oil-Loaded Microcapsules Containing Whey Protein Hydrolysate as Film-Forming Material for Fortification of Low-Fat Mayonnaise / N. E. Rahmani-Manglano, I. González-Sánchez, P. J. García-Moreno [et al.]. – DOI: 10.3390/foods9050545 // Foods. – 2020. – Vol. 9 (5). – P. 545.
8. Advances in Therapeutic Applications of Fish Oil: A review / P. Das, A. Dutta, T. Panchali [et al.]. – DOI: 10.1016/j.meafoo.2024.100142 // Measurement Food. – 2024. – Vol. 13. – P. 100–142.
9. Evaluation of the balance of oils from fish by-products / S. V. Agafonova, O. Y. Mezenova, V. V. Volkov, A. I. Rykov. – DOI: 10.1088/1755-1315/689/1/012027 // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Kaliningrad, 2020. – Kaliningrad. – 2021. – P. 12–27.
10. Lecithin and cardiovascular health: a comprehensive review / M. O. Onaolapo, O. D. Alabi, O. P. Akano [et al.]. – DOI: 10.1186/s43044-024-00523-0 // Egypt Heart J. – 2024. – Vol. 76 (1). – P. 92.
11. Ghosh, B. A Review On Phytosterol (Ps) Enriched Mayonnaise / B. Ghosh, I. Bhowmik, S. Dey. – DOI: 10.53555/jaz.v44iS5.3295 // Journal of Advanced Zoology. – 2023. – Vol. 44 (S5). – P. 2624–2629.
12. The possibilities of using double emulsions in the food industry: in 2 part. Part 2: Formation of new format food systems / U. Bagale, I. V. Kalinina, N. V. Naumenko [et al.]. – DOI: 10.14529/food230103 // Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology. – 2023. – № 1. – P. 27–34.
13. Merenkova, S. P. Analysis of rheological properties of vegetable and mayonnaise sauces developed using functional vegetable additives / S. P. Merenkova, A. A. Lukin // Scientific journal of the ITMO University. Series: Food production processes and apparatuses. – 2015. – № 4. – P. 96–105.

14. Agafonova, S. V. Antioxidant activity of CO₂ extracts of some plants and prospects for their use in fish oil technology / S. V. Agafonova, L. S. Baydalinova // Bulletin of the International Academy of Refrigeration. – 2015. – № 2. – P. 13–17.
15. Kumar, Y. Ultrasonication of mayonnaise formulated with xanthan and guar gums: Rheological modeling, effects on optical properties and emulsion stability / Y. Kumar. – DOI: 10.1016/j.lwt.2021.111632 // LWT – Food Science and Technology. – 2021. – Vol. 149. – Article 111632.
16. Milen'kiy, A. V. Obtaining hydrolysate from recycled salmon by enzymatic and thermal hydrolysis / A. V. Milen'kiy, S. V. Agafonova, E. A. Agafonov // Proceedings of the XII International Baltic Sea Forum (Kaliningrad, September 30 – October 04 2024) / Kaliningrad State Technical University. – Kaliningrad: Publishing house of Baltic Fishing Fleet State Academy, 2024. – P. 147–153.
17. Milen'kiy, A. V. Research on the technology of emulsion sauce of increased biological value / A. V. Milen'kiy, S. V. Agafonova. – DOI: 10.46845/2541-8254-2023-3(40)-51-51 // Bulletin of Youth Science. – 2023. – № 3 (40). – P. 14.
18. Synergistic Effects of Natural Product Combinations in Protecting the Endothelium Against Cardiovascular Risk Factors / M. Yousaf, V. Razmovski-Naumovski, M. Zubair [et al.]. – DOI: 10.1177/2515690X221113327 // Journal of Evidence-Based Integrative Medicine. – 2022. – Vol. 27. – P. 328–347.
19. Bioactive Compounds and Health Benefits of Carrot / N. Rafiq, N. Gupta, S. Gupta, D. P. Kour // Indian Farmer. – 2022. – Vol. 9 (11). – P. 506–510.
20. Polyphenol-rich extract from blackcurrant pomace attenuates the intestinal tract and serum lipid changes induced by a high-fat diet in rabbits / A. Jurgoński, J. Juśkiewicz, Z. Zduńczyk [et al.]. – DOI: 10.1007/s00394-014-0665-4 // Eur. J. Nutr. – 2014. – Vol. 53 (8). – P. 1603–161.

Информация об авторах

А. В. Миленский – магистрант кафедры пищевой биотехнологии

С. В. Агафонова – кандидат технических наук, доцент кафедры пищевой биотехнологии

Information about the authors

A. V. Milenkiy – Master's student of the Department of Food Biotechnology

S. V. Agafonova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Food Biotechnology

Вклад авторов

А. В. Миленский – идея, сбор материала, обработка материала

С. В. Агафонова – научное руководство, написание статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

A. V. Milenkiy – idea, collection of material, processing of material

S. V. Agafonova – scientific guidance, writing an article

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 11.07.2025; одобрена после рецензирования 23.07.2025; принята к публикации 15.10.2025.

The article was submitted 11.07.2025; approved after reviewing 23.07.2025; accepted for publication 15.10.2025.

Научная статья
УДК 664.11:543.21
DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-99-109

**Исследование термически индуцированных структурных превращений
D-маннита методами молекулярной спектроскопии**

Игорь Сергеевич Черепанов¹, Дарья Владимировна Новоселова²

^{1,2} Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия

¹cherchem@mail.ru[✉], <http://orcid.org/0000-0002-0880-5474>

Аннотация. Применение пищевых добавок различной функциональности является в настоящее время одним из основных направлений развития кондитерской промышленности, при этом в ходе термообработки сырьевой массы вещества испытывают структурные превращения различного характера. Изучение подобных трансформаций позволяет направленно регулировать параметры технологических процессов, в связи с чем в настоящей работе представлены результаты исследований полиморфных превращений D-маннита (пищевая добавка E421) при контролируемом термостатировании при температуре 180 °С во временном интервале до 3 ч методами УФ-электронной и ИК-колебательной спектроскопии. Анализ колебательных спектров показывает присутствие исходного коммерческого препарата D-маннита в форме наиболее термодинамически выгодной β-модификации, тогда как все термостатированные твердые фазы представлены α-модификациями. Последнее надежно подтверждается изучением ИК-спектральных профилей как среднечастотной (900–1800 см⁻¹), так и высокочастотной (2800–3000 см⁻¹) областей. При этом следует отметить отсутствие интенсивных полос в области 1650–1800 см⁻¹, что указывает на подавление процессов окислительной деструкции маннита. Исследование динамики изменения температур плавления твердых фаз и профилей электронных спектров ультрафиолетовой области их 1 %-ных растворов показывает экстремум (174 °С) и выраженный максимум при 260 нм для пробы, термостатированной в течение 1,5 ч. Можно предположить, что в данных экспериментальных условиях возможно параллельное с фазовыми переходами протекание химических процессов, вероятно, дегидратации и циклизации. Полученные результаты предполагается положить в основу разрабатываемой технологии термообработки полиолов для получения комбинированных пищевых добавок на их основе в условиях воздействия повышенных температур.

Ключевые слова: D-маннит, термические реакции, структура, полиморфные модификации, молекулярная спектроскопия.

Для цитирования: Черепанов И. С., Новоселова Д. В. Исследование термически индуцированных структурных превращений D-маннита методами молекулярной спектроскопии // Известия КГТУ. 2025. № 79. С. 99–109. DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-99-109.

Original article

Study of thermal induced structural transformations of *D*-mannitol using molecular spectroscopy methods

Igor' S. Cherepanov¹, Dar'ya V. Novoselova²

^{1,2} Udmurt State university, Izhevsk, Russia

¹cherchem@mail.ru[✉], <http://orcid.org/0000-0002-0880-5474>

Abstract. The use of food additives of various functionality is currently one of the main strategies of the confectionery industry, while during the heat treatment of the raw mass, substances undergo structural transformations of various nature. The study of such transformations allows for the targeted regulation of the parameters of technological processes, and therefore, this paper presents the results of studies of polymorphic transformations of *D*-mannitol (food additive *E421*) during thermostating at a temperature of 180 °C in a time interval of up to 3 hours using UV-electronic and IR-vibrational spectroscopy. Analysis of the vibrational spectra shows the presence of the initial commercial *D*-mannitol preparation in the form of the most thermodynamically favorable β -modification, whereas all the thermostatted solid phases are represented by α -modifications. The latter is reliably confirmed by the study of the IR spectral profiles of both the mid-frequency (900–1800 cm⁻¹) and high-frequency (2800–3000 cm⁻¹) regions. At the same time, the absence of intensive bands in the region of 1650–1800 cm⁻¹ should be noted, which indicates the suppression of the processes of oxidative destruction of mannitol. The study of the dynamics of changes in solid phases melting points and profiles of their electronic spectra in the ultraviolet region shows an extremum (174 °C) and a pronounced maximum at 260 nm for a sample that was thermostatted for 1.5 hours. It can be assumed that under these experimental conditions, chemical processes may occur in parallel with phase transitions, possibly involving dehydration and cyclization. These results are expected to serve as the basis for the development of a thermo-processing technology for polyols to produce combined food additives based on them under the conditions of elevated temperatures.

Keywords: *D*-mannitol, thermal induced reaction, structure, polymorphic modifications, molecular spectroscopy.

For citation: Cherepanov I. S., Novoselova D. V. Study of thermal induced structural transformations of *D*-mannitol using molecular spectroscopy methods. *Izvestiya KGTU = KGTU News*. 2025;(79):99–109. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-99-109.

ВВЕДЕНИЕ

Многоатомные спирты – производные углеводов – являются важными фармацевтическими препаратами и пищевыми добавками, характеризуются полиморфизмом, их свойства во многом определяются структурными особенностями. Подобные вещества способны к регулированию экзотермии технологических процессов за счет собственных фазовых переходов [1]. Одним из наиболее перспективных соединений с подобными свойствами, активно исследуемых в последние годы, является *D*-маннит (пищевая добавка-сахарозаменитель *E421* с низким гликемиче-

ским индексом), физические константы которого отвечают реализации температурных режимов промышленных процессов (130–180 °C). Кроме того, находясь в различных модификациях, *D*-маннит проявляет разный характер взаимодействия с другими компонентами, что позволяет регулировать свойства сложных пищевых систем, в частности, гидроколлоидов с целью повышения вязкости и теплостойкости шоколадных композиций [2]. Важным аспектом является также установление возможности протекания и характера побочных процессов, что имеет важное значение для технологии производства кондитерских изделий [2, 3].

К настоящему времени показано, что структура *D*-маннита может быть представлена тремя модификациями [3] – α , β и δ , взаимопревращения которых традиционно изучается методами рентгеноструктурного анализа [4]. Тем не менее существует необходимость разработки информативных и более экспрессных методов в промышленном анализе пищевого сырья и фармпрепаратов, в связи с чем в научной литературе встречаются указания на принципиальную возможность применения спектральных методов для изучения фазовых превращений полиолов, в том числе процессов кристаллизации из расплавов и различных растворителей [5]. Высокой информативности при изучении описанных систем следует ожидать от метода ИК-спектроскопии, позволяющего надежно фиксировать структурные изменения, происходящие при термообработке функционализированных органических веществ [6]. Совокупный анализ ИК-спектров и спектров УФ-области, дополненных данными по температурам плавления, даст возможность оценить потенциал технологий производства комбинированных пищевых добавок в условиях воздействия повышенных температур.

Целью работы являлось исследование полиморфных превращений *D*-маннита (пищевой добавки *E421*) в области температур его фазовых переходов методами колебательной и электронной спектроскопии. В соответствии с поставленной целью решались задачи контролируемого термостатирования коммерческого препарата *D*-маннита при температуре 180 °C во временном интервале до 3 ч и последующий анализ молекулярных спектров термостатированных твердых фаз посредством отнесения полос поглощения, характеризующих изменение структуры.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Термостатирование проводили в течение 3 ч в соответствии с методикой [7], отбирая пробы твердой фазы через 0,5; 1,0; 1,5 и 3 ч, с использованием в качестве исходного коммерческого препарата *D*-маннита фирмы «Merck». По окончании термостатирования для каждой пробы регистрировали ИК-спектры и определяли температуры их плавления нагреванием твердых фаз в односторонне-запаянных капиллярах диаметром 1 мм в колбах Кьельдаля. Спектры регистрировали в режиме пропускания в таблетках KBr («Fluka», 1:200) на ИК-Фурье спектрометре ФСМ 2201 («Инфраспек», СПб, Россия), в интервале волновых чисел 4000–400 см⁻¹ со спектральным разрешением по волновому числу 4 см⁻¹ при 60 сканах относительно воздуха, интенсивность полос определялась по методу базовой линии. Дополнительно получали электронные спектры 1 %-ных водных растворов каждой пробы в кварцевых кюветах с длиной оптического пути 1 см, с

разрешением по длине волны 2 нм (спектрофотометр СФ-2000 «Спектр», СПб, Россия). Кратность всех измерений составляла не менее трех экспериментов.

Колебательные спектры исходного и закристаллизованных после нагревания выше температуры плавления в течение заданного времени образцов *D*-маннита представлены на рис. 1. Сопоставление колебательных спектров исходного препарата со спектрами продуктов, полученных при кристаллизации нагретых выше температуры плавления систем, показывает отличия в областях $1150\text{--}1500\text{ см}^{-1}$ и $700\text{--}1000\text{ см}^{-1}$.

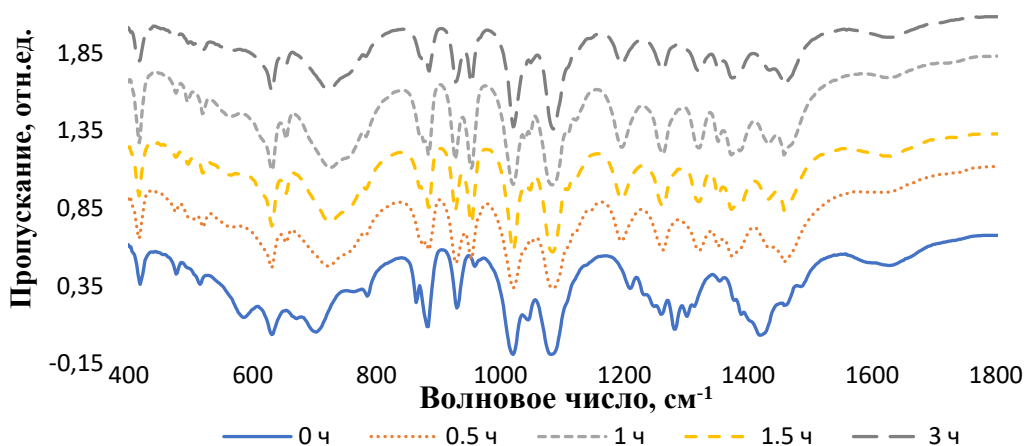


Рис. 1. Колебательные спектры (средне- и низкочастотная области) коммерческого и термообработанных в течение заданного времени образцов *D*-маннита
Fig. 1. Vibrational spectra (mid- and lowfrequency areas) of commercial and thermo-treated in the various duration *D*-mannitol samples

Согласно имеющимся в литературе данным, в первом случае наблюдается усиление полос в области $1260\text{--}1280\text{ см}^{-1}$ (δ_{OH}) и появление интенсивной полосы 1321 см^{-1} (ν_{CO}), что обсуждалось авторами [5] при исследовании процессов кристаллизации *D*-маннита из расплава, дополнительно отмечается отсутствие в спектре коммерческого препарата полос 1196 см^{-1} (ν_{CCC}) и 1370 см^{-1} (δ_{CH}), регистрирующихся в спектрах всех термически обработанных образцов [5]. В низкочастотной области изменение спектрального профиля выражается в усилении полосы 960 см^{-1} ($\delta^{\text{as}}_{\text{CCO}}$) и нивелировании полосы 864 см^{-1} ($\delta^{\text{s}}_{\text{CCO}}$) [8] при переходе от исходного коммерческого образца к термостатированным, а также смещении широкого сигнала скелетных колебаний 702 см^{-1} (исходный) к значениям 720 см^{-1} (после термостатирования). При этом в указанных работах не проводится детальный структурный анализ, отвечающий рассмотренным смещениям спектральных полос.

Можно предположить, что описанные изменения связаны с фазовыми переходами между различными модификациями *D*-маннита: α -модификация идентифицируется по сигналам 1194 и $1370 + 1388\text{ см}^{-1}$, β -модификация – по наличию полосы 1209 см^{-1} и соотношению интенсивностей полос дублета $930\text{ (с)} + 960\text{ (сл)}\text{ см}^{-1}$, γ -модификация – по полосе 970 см^{-1} [9]. Сравнение литературных данных с полученными в ходе эксперимента показывает преобладающую β -модификацию для исходного коммерческого препарата (отсутствие полос 1196 и 1370 см^{-1} , сигнал 1209 см^{-1} и несимметричный дублет $930\text{ (с)} + 960\text{ (сл)}\text{ см}^{-1}$), тогда как практически независимо от времени термостатирования из расплава кристаллизуется

преимущественно α -модификация (полосы 1196 и 1370 см^{-1}) (рис. 1, таблица). Усиление слабой полосы 960 см^{-1} дублета β -модификации свидетельствует об образовании в системе равновесной смеси модификаций D -маннита, присутствие δ -модификации не фиксируется ни в одном из образцов.

Таблица. Обобщение результатов анализа колебательных спектров
Table. Summarizing of vibrational spectra analysis data

$\nu, \text{см}^{-1}$	Отнесение	0 ч	0.5 ч	1 ч	1,5 ч	3 ч
1370	$\delta_{\text{CH}} (\alpha)$	–	ср.	ср.	ср.	ср.
1209	$\nu_{\text{CO}} (\beta)$	ср.	–	–	–	–
1196	$\nu_{\text{CCC}} (\alpha)$	–	ср.	ср.	ср.	ср.
970	$\delta^{\text{as}}_{\text{CCO}} (\delta)$	–	–	–	–	–
960	$\delta^{\text{as}}_{\text{CCO}} (\beta)$	сл.	ср.	ср.	ср.	ср.
930	$\delta^{\text{s}}_{\text{CCO}} (\beta)$	с.	с.	с.	с.	с.
864	$\delta^{\text{s}}_{\text{CCO}}$	ср.	сл.	сл.	сл.	сл.

с. – сильная ($T = 0.2-0.4$); ср. – средняя ($T = 0.4-0.6$); сл. – слабая ($T = 0.6-0.8$);

Анализ высокочастотной части спектров (рис. 2) также позволяет получить информацию о конформационных превращениях маннита. Область валентных колебаний С-Н-фрагментов согласно [4] характеризуется наличием нескольких полос в интервале 2960–2920 см^{-1} для α -модификаций, что связано с взаимодействием колебаний связей, находящихся в определенных конформационных положениях. Наиболее вероятно в этом случае заслоненное расположение С-О-фрагментов, что повышает энергию такой конформации.

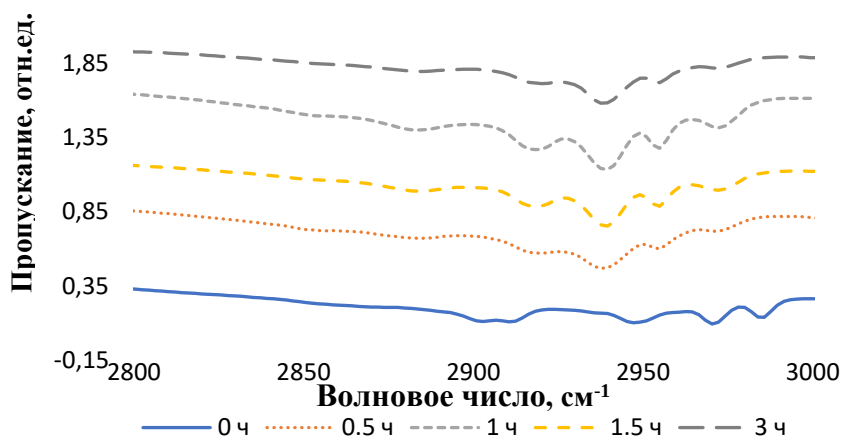


Рис. 2. Колебательные спектры (высокочастотная область) коммерческого и термообработанных в течение заданного времени образцов D -маннита
Fig. 2. Vibrational spectra (highfrequency area) of commercial and thermostatted in the various duration D -mannitol samples

Таким образом, заслоненная конформация α -модификации характеризуется пространственными затруднениями в расположении заместителей, что приводит к снижению ее стабильности, тогда как β -модификация, в которой соседние

фрагменты находятся в трансoidном (заторможенном) положении (рис. 3), является наиболее термодинамически выгодной [10]:

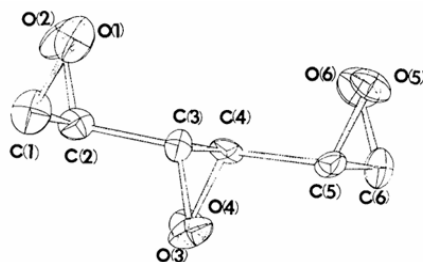


Рис. 3. Пространственное строение молекулы *D*-маннита
Fig. 3. *D*-mannitol molecule geometric structure

Изображение заторможенной конформации β -модификации (рис. 3) дополнительно иллюстрирует взаимное расположение $C_n-O_n(H)$ -фрагментов: пространственное альтернирование их положений $C_1-O_1 + C_2-O_2 - C_3-O_3 + C_4-O_4 - C_5-O_5 + C_6-O_6$ обуславливает наиболее устойчивое состояние молекулярной системы.

Температуры плавления исследуемых твердых фаз изменяются в сторону увеличения от коммерческого образца к термостатированным (рис. 4). Анализ зависимости (рис. 3) показывает увеличение температуры плавления термостатированных образцов в сравнении с коммерческим, что обусловлено особенностями формирования структуры при кристаллизации [11] и также может быть связано с изменением спектральных характеристик.

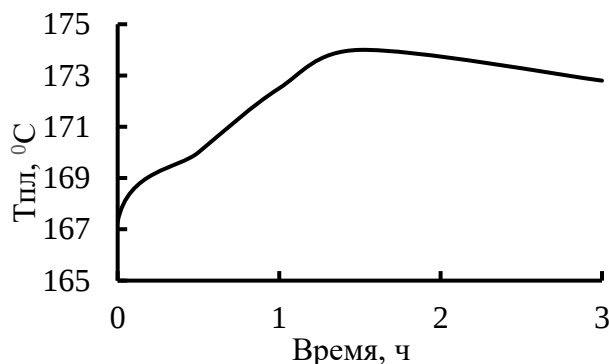


Рис. 4. Динамика изменения температур плавления в зависимости от продолжительности термостатирования
Fig. 4. Melting points changing dynamics depending on thermostating duration

Общие изменения спектральных профилей в области $1400-1500\text{ см}^{-1}$ (рис. 1) сводятся к увеличению числа полос и смещению основного пика 1421 см^{-1} (δ_{CH_2}) к значениям 1462 см^{-1} независимо от продолжительности термостатирования, полоса 1283 см^{-1} (δ_{OH/CH_2OH}) [12] в спектрах термостатированных образцов полностью нивелируется, что связывается с дополнительными взаимодействиями с участием CH_2OH -групп.

Анализ электронных спектров показывает в видимой области отсутствие полос поглощения (рис. 5), при этом в ультрафиолетовой области начиная с $t = 1\text{ ч}$

формируется полоса в интервале 250–260 нм и для $t = 1,5$ ч проявляется четкий пик 260 нм, несколько спадающий по интенсивности к $t = 3$ ч. В то же время детальное изучение интервала 1100–1200 см^{-1} ИК-спектров (рис. 1) позволяет обнаружить плечо при 1100 см^{-1} для образца, термостатированного при $t = 1,5$ ч, и аналогичные менее выраженные сигналы для $t = 1$ и 3 ч. Данный эффект согласно [13] характерен для образования циклических ангидропроизводных полиолов в процессе термостатирования.

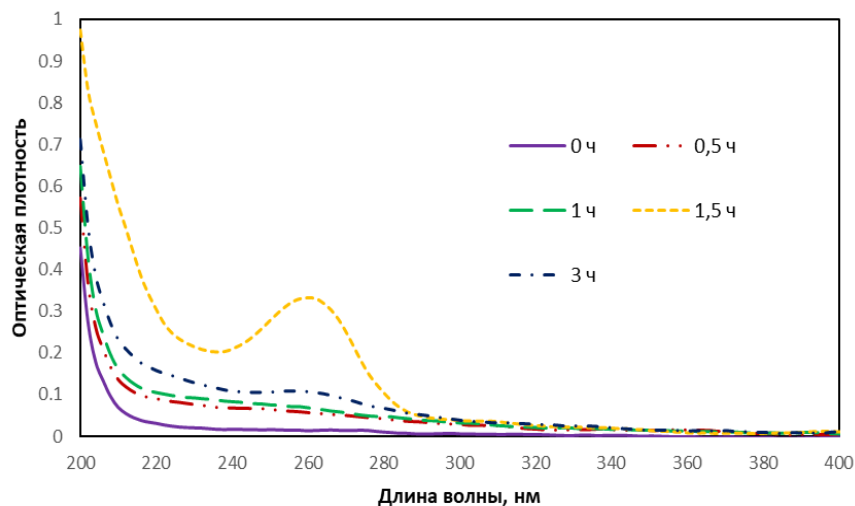


Рис. 5. Электронные спектры 1 %-ных водных растворов коммерческого и термостатированных образцов *D*-маннита

Fig. 5. UV-Vis spectra of 1% aqueous solutions of commercial and thermostatted in the various duration *D*-mannitol samples

На основании анализа полученных данных можно предположить, что в процессе термостатирования к моменту $t = 1,5$ ч образуются некоторые количества циклических производных маннита [14]:

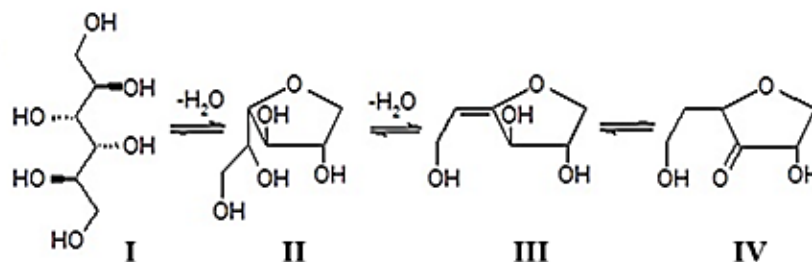


Рис. 6. Схема побочных процессов при термодеструкции *D*-маннита

Fig. 6. Scheme of *D*-mannitol thermodestruction side reactions

Молекула маннита (I) при нагревании претерпевает дегидратацию (рис. 6), образуя предельный циклический спирт (II), который отщепляет еще одну молекулу воды, что приводит к непредельному спирту (III), находящемуся в таутомерном равновесии с гидроксикетоном (IV), к хромофорной группе последнего можно отнести поглощение при 260 нм.

Полосы в интервале 1650–1800 см^{-1} , относимые к валентным колебаниям $\text{C}=\text{C}+\text{C}=\text{O}$ -фрагментов продуктов окисления [1], в спектрах не регистрируются,

что, вероятно, обусловлено низким содержанием форм с кратными связями, при этом, как показано в [15], сигналы $\nu_{C=O, C=C}$ в принципе характеризуются в подобных системах невысокой интенсивностью.

Можно также предположить, что в твердой фазе присутствует преимущественно $C=C$ -форма, повышающая температуру плавления, при этом полоса валентных колебаний $C=C$ в тризамещенной структуре в ИК-спектрах ослаблена. В растворах вероятно преобладание $C=O$ -формы, что проявляется в интенсивном поглощении 260 нм в УФ-спектрах; дальнейший спад интенсивности данного сигнала обусловлен последующим развитием процессов [16], что, вероятно, еще предстоит изучить. Дальнейшим направлением представленных исследований планируется изучение влияния температурных режимов на структурные превращения полиолов [17], что позволит прогнозировать выбор оптимальных условий термообработки в промышленных технологиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, изучено поведение коммерческого образца *D*-маннита (пищевая добавка *E421*) в условиях воздействия постоянной температуры (180 °C) в течение 3 ч. Показано, что в течение 1 ч термостатирования происходят исключительно фазовые превращения из более устойчивой β -модификации (исходный коммерческий образец) в α -модификацию (термостатированные образцы). Увеличение продолжительности термообработки до 1,5 ч показывает начало протекания побочных процессов, что подтверждается динамикой изменения температур плавления и характера спектральных профилей.

Список источников

1. Bayon, R. Feasibility Study of *D*-mannitol as Phase Change Material for Thermal Storage / R. Bayon, E. Rojas. – DOI: 10.3934/energy.2017.3.404 // AIMS Energy. – 2017. – Vol. 5(3). – P. 404–424.
2. Cassanelli, M. Interaction of Mannitol and Sucrose with Gellan Gum Freezedried Gel Systems / M. Cassanelli, I. Norton, T. Mills. – DOI: 10.1007/s11483-018-9536-5 // Food Biophysics. – 2018. – Vol. 13. – P. 304–315.
3. Characteristics and Analytical Methods of *D*-mannitol: an Update / A. Shiravastava, S. Sharma, M. Kaurav, A. Sharma. – DOI: 10.22159/ijap.2021v13i5.42068 // Int. J. Appl. Pharm. 2021. – Vol. 13 (5). – P. 20–32.
4. Energy/Temperature Diagram and Compression Behavior of the Polymorphs of *D*-mannitol / A. Burger, J.-O. Henck, S. Hetz [et al.]. – DOI: 10.1002/(SICI)1520-6017(200004)89:4<457::AID-JPS3>3.0.CO;2-G // J. Pharm. Sci. – 2000. – Vol. 89 (4). – P. 457–468.
5. Physico-Chemical Characterization of Anhydrous *D*-mannitol / G. Bruni, V. Berbenni, C. Malanese [et al.]. – DOI: 10.1007/s10973-008-9384-5 // J. Therm. Anal. Cal. – 2009. – Vol. 95 (3). – P. 871–876.
6. Cherepanov, I. S. Growth Regulating Activity of *p*-aminobenzoic Acid – *D*-Glucose System Melanoidins / I. S. Cherepanov. – DOI: 10.1063/5.0068900 // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2390. – P. 030009-1–030009-4.

7. Rodrigues-Garcia, M.M. Stability of *D*-mannitol Upon Melting/Freezing Cycles Under Controlled Inert Atmosphere / M. M. Rodrigues-Garcia, R. Bayon, E. Rojas. – DOI: 10.1016/j.egypro.2016.06.207 // Energy Procedia. – 2016. – Vol. 91. – P. 218–225.
8. Simultaneous Quantitative Analysis of Ternary Mixtures of *d*-mannitol Polymorphs by FT-Raman Spectroscopy and Multivariate Calibration Models / D. Braun, S. Maas, N. Zencirci [et al.]. – DOI: 10.1016/j.ijpharm.2009.10.019 // Int. J. Pharm. – 2010. – Vol. 385. – P. 29–36.
9. Kayaly, W. Influence of Mannitol Concentration on the Physicochemical, Mechanical and Pharmaceutical Properties of Lyophilised mannitol / W. Kayaly, U. Khan, S. Maewlud. – DOI: 10.1016/j.ijpharm.2016.05.052 // Int. J. Pharm. – 2016. – Vol. 510. – P. 73–85.
10. Selective Crystallization of *D*-mannitol Polymorphs Using Surfactant Self-assembly / F. Penha, A. Gopalan, J. Meijlink [et al.]. – DOI: 10.1021/acs.cgd.1c00243 // Cryst. Growth Des. – 2021. – Vol. 21. – P. 3928–3935.
11. Influence of Batch Cooling Crystallization on Mannitol Physical Properties and Drug Dispersion from Dry Powder Inhalers / W. Kayaly, H. Larhrib, M. Ticehurst, A. Nokhodchi. – DOI: 10.1021/cg300224w // Cryst. Growth Des. – 2012. – Vol. 12. – P. 3006–3017.
12. Development of a Pure Certified Reference Material of *D*-mannitol / W. Chen, Y. Zhang, H. Chen [et al.]. – DOI: 10.3390/molecules28196794 // Molecules. – 2023. – Vol. 28. – 6794.
13. Cycling Stability of *D*-mannitol when Used as Phase Change Material for Thermal Storage Applications / H. Newmann, S. Niedermaier, S. Gschwander, P. Schossig. – DOI: 10.1016/j.tca.2017.12.026 // Thermochim. Acta. – 2018. – Vol. 660. – P. 134–143.
14. The Solvent-free Thermal Dehydration of Hexitols on Zeolites / M. Kurszewska, E. Skorupova, J. Madaj [et al.]. – DOI: 10.1016/s0008-6215(02)00129-5 // Carbohydr. Res. – 2002. – Vol. 337. – P. 1261–1268.
15. Thermal Stability Enhancement of *D*-mannitol for latent Heat Storage Applications / H. Newmann, D. Burger, Y. Taftanazi [et al.]. – DOI: 10.1016/j.solmat.2019.109913 // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2019. – Vol. 200. – 109913.
16. Intramolecular Dehydration of Biomass-derived Sugar Alcohols in High-temperature Water / A. Yamaguchi, N. Muramatsu, N. Mimura [et al.]. – DOI: 10.1039/c6cp06831f // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2017. – Vol. 19. – P. 2714–2722.
17. Моргунова, Е. М. Технологические особенности разработки кондитерских изделий с использованием полиолов / Е. М. Моргунова, Т. В. Шугаева, К. Н. Гершончик. – DOI: 10.47612/2073-4794-2021-14-3(53)-19-31 // Пищевая промышленность: наука и технологии. – 2021. – Т. 14, № 3. – С. 19–31.

References

1. Bayon, R. Feasibility Study of *D*-mannitol as Phase Change Material for Thermal Storage / R. Bayon, E. Rojas. – DOI: 10.3934/energy.2017.3.404 // AIMS Energy. – 2017. – Vol. 5(3). – P. 404–424.

2. Cassanelli, M. Interaction of Mannitol and Sucrose with Gellan Gumin Freeze-dried Gel Systems / M. Cassanelli, I. Norton, T. Mills. – DOI: 10.1007/s11483-018-9536-5 // Food Biophysics. – 2018. – Vol. 13. – P. 304–315.
3. Characteristics and Analytical Methods of *D*-mannitol: an Update / A. Shiravastava, S. Sharma, M. Kaurav, A. Sharma. – DOI: 10.22159/ijap.2021v13i5.42068 // Int. J. Appl. Pharm. 2021. – Vol. 13(5). – P. 20–32.
4. Energy/Temperature Diagram and Compression Behavior of the Polymorphs of *D*-mannitol / A. Burger, J.-O. Henck, S. Hetz [et al.]. – DOI:10.1002/(SICI)1520-6017(200004)89:4<457::AID-JPS3>3.0.CO;2-G // J. Pharm. Sci. – 2000. – Vol. 89 (4). – P. 457–468.
5. Physico-Chemical Characterization of Anhydrous *D*-mannitol / G. Bruni, V. Berbenni, C. Malanese [et al.]. – DOI: 10.1007/s10973-008-9384-5 // J. Therm. Anal. Cal. – 2009. – Vol. 95 (3). – P. 871–876.
6. Cherepanov, I. S. Growth Regulating Activity of *p*-aminobenzoic Acid – *D*-Glucose System Melanoidins / I. S. Cherepanov. – DOI: 10.1063/5.0068900 // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2390. – P. 030009-1–030009-4.
7. Rodrigues-Garcia, M.M. Stability of *D*-mannitol Upon Melting/Freezing Cycles Under Controlled Inert Atmosphere / M. M. Rodrigues-Garcia, R. Bayon, E. Rojas. – DOI: 10.1016/j.egypro.2016.06.207 // Energy Procedia. – 2016. – Vol. 91. – P. 218–225.
8. Simultaneous Quantitative Analysis of Ternary Mixtures of *d*-mannitol Polymorphs by FT-Raman Spectroscopy and Multivariate Calibration Models / D. Braun, S. Maas, N. Zencirci [et al.]. – DOI: 10.1016/j.ijpharm.2009.10.019 // Int. J. Pharm. – 2010. – Vol. 385. – P. 29–36.
9. Kayaly, W. Influence of Mannitol Concentration on the Physicochemical, Mechanical and Pharmaceutical Properties of Lyophilised mannitol / W. Kayaly, U. Khan, S. Maewlud. – DOI: 10.1016/j.ijpharm.2016.05.052 // Int. J. Pharm. – 2016. – Vol. 510. – P. 73–85.
10. Selective Crystallization of *D*-mannitol Polymorphs Using Surfactant Self-assembly / F. Penha, A. Gopalan, J. Meijlink [et al.]. – DOI: 10.1021/acs.cgd.1c00243 // Cryst. Growth Des. – 2021. – Vol. 21. – P. 3928–3935.
11. Influence of Batch Cooling Crystallization on Mannitol Physical Properties and Drug Dispersion from Dry Powder Inhalers / W. Kayaly, H. Larhrib, M. Ticehurst, A. Nokhodchi. – DOI: 10.1021/cg300224w // Cryst. Growth Des. – 2012. – Vol. 12. – P. 3006–3017.
12. Development of a Pure Certified Reference Material of *D*-mannitol / W. Chen, Y. Zhang, H. Chen [et al.]. – DOI: 10.3390/molecules28196794 // Molecules. – 2023. – Vol. 28. – P. 6794.
13. Cycling Stability of *D*-mannitol when Used as Phase Change Material for Thermal Storage Applications / H. Newmann, S. Niedermaier, S. Gschwander, P. Schossig. – DOI: 10.1016/j.tca.2017.12.026 // Thermochim. Acta. – 2018. – Vol. 660. – P. 134–143.
14. The Solvent-free Thermal Dehydration of Hexitols on Zeolites / M. Kurszewska, E. Skorupova, J. Madaj [et al.]. – DOI: 10.1016/s0008-6215(02)00129-5 // Carbohydr. Res. – 2002. – Vol. 337. – P. 1261–1268.
15. Thermal Stability Enhancement of *D*-mannitol for latent Heat Storage Applications / H. Newmann, D. Burger, Y. Taftanazi [et al.]. – DOI: 10.1016/

j.solmat.2019.109913 // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2019. – Vol. 200. – 109913.

16. Intramolecular Dehydration of Biomass-derived Sugar Alcohols in High-temperature Water / A. Yamaguchi, N. Muramatsu, N. Mimura [et al.]. – DOI: 10.1039/c6cp06831f // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2017. – Vol. 19. – P. 2714–2722.

17. Morgunova, E. M. Technological Aspects of Development Confectionary Products with Polyols / E. M. Morgunova, T. V. Shugaeva, K. N. Gershonchik. – DOI: 10.47612/2073-4794-2021-14-3(53)-19-31 // Food Industry: Science and Technologies. – 2021. – Vol. 14(3). – P. 19–31.

Информация об авторах

И. С. Черепанов – кандидат химических наук, доцент

Д. В. Новоселова – студент 4 курса направления подготовки «Химия»

Information about the authors

I. S. Cherepanov – Candidate of Sciences (Chemistry), associate professor

D. V. Novoselova – 4th year student in Chemistry

Вклад авторов

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article

The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 05.09.2025; одобрена после рецензирования 15.09.2025; принята к публикации 17.09.2025.

The article was submitted 05.09.2025; approved after reviewing 15.09.2025; accepted for publication 17.09.2025.

СУДОСТРОЕНИЕ, МАШИНОСТРОЕНИЕ И ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья
УДК 624.073.121
DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-113-126

К вопросу о расчете жесткой прямоугольной изотропной пластины с жестко закрепленным контуром под действием сосредоточенной нагрузки в центре пластины

Дмитрий Александрович Романюта¹, Алексей Сергеевич Ариенчук²

^{1, 2}Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

¹dmitrij.romanyuta@klgtu.ru^{}, <https://orcid.org/0000-0002-0828-5990>

²aleksej.arienchuk@klgtu.ru

Аннотация. В статье рассматривается вопрос корректности выполнения расчета на изгиб прямоугольной жесткой изотропной пластины с защемленным периметром под действием центрально приложенной сосредоточенной силы. Показано, что различные источники, посвященные разбору данной расчетной схемы, предлагают разные формулы для определения максимального прогиба по центру пластины и максимального значения удельного изгибающего момента по центру длинной кромки пластины. При этом, условно, справочная литература предлагает два типа формул расчета для определения каждой из указанных величин. Произведен поиск различных работ и статей, посвященных рассматриваемому в статье вопросу. Найдено несколько источников, в которых может быть подробно раскрыта последовательность решения изгиба данных пластин, но эти источники являются депонированными. Выполнен анализ размерностей расчетных формул и вспомогательных расчетных коэффициентов, расчет трех различных пластин с изменением коэффициента соотношения сторон. Выбор корректной расчетной формулы выполнен на основе сравнительного анализа результатов расчета с расчетом пластин методом конечных элементов в программном комплексе Fidesys. В рамках рассмотренных расчетных схем погрешность определения максимального прогиба и максимального значения удельного изгибающего момента по длинной стороне пластины по одной группе формул не превышала 5 %, по другой группе формул погрешность расчета достигала 75 %. Определена погрешность применения расчетных формул для материалов пластин с коэффициентом Пуассона, отличающимся от 0,3.

Ключевые слова: пластина, жесткая заделка, расчет прогибов, метод конечных элементов, Fidesys, сравнительный анализ.

Для цитирования: Романюта Д. А., Ариенчук А. С. К вопросу о расчете жесткой прямоугольной изотропной пластины с жестко закрепленным контуром под действием сосредоточенной нагрузки в центре пластины // Известия КГТУ. 2025. № 79. С. 113–126. DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-113-126.

Original article

On the issue of calculating a rigid rectangular isotropic plate with a rigidly fixed contour under the action of a concentrated load in the center of the plate

Dmitriy A. Romanyuta^{1✉}, Aleksey S. Arienchuk²

^{1,2} Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

¹ dmitrij.romanyuta@klgtu.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-0828-5990>

² aleksej.arienchuk@klgtu.ru

Abstract. The article considers the issue of the correctness of the calculation of the bending of a rectangular rigid isotropic plate with a clamped perimeter under the action of a centrally applied concentrated force. It is shown that various sources devoted to the analysis of this calculation scheme offer different formulas for determining the maximum deflection at the plate center and the maximum value of the specific bending moment at the center of the long edge of the plate. Moreover, conventionally, the reference literature offers two types of calculation formulas for determining each of these quantities. A search has been conducted for various works and articles devoted to the issue considered in the article. Several sources have been found in which the sequence of solving the bending of these plates can be disclosed in detail, but these sources are deposited. An analysis of the dimensions of the calculation formulas and auxiliary calculation coefficients has been performed. Calculations have been performed for three different plates with a change in the aspect ratio. The correct calculation formula is selected based on a comparative analysis of the calculation results with the calculation of plates by the finite element method in the Fidesys software package. Within the framework of the considered calculation schemes, the error in determining the maximum deflection and the maximum value of the specific bending moment along the long side of the plate according to one group of formulas does not exceed 5 %, while according to another group of formulas, the calculation error reaches 75 %. The error in applying the calculation formulas for plate materials with a Poisson's ratio different from 0.3 has been determined.

Keywords: plate, rigid fixation, deflection calculation, finite element method, Fidesys, comparative analysis.

For citation: Romanyuta D. A., Arienchuk A. S. On the issue of calculating a rigid rectangular isotropic plate with a rigidly fixed contour under the action of a concentrated load in the center of the plate. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2025;(79):113–126. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-113-126.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование изгиба жесткой пластины (определение реакций в закреплениях, максимального изгибающего момента и поиск максимальной стрелки прогиба пластины), как известно, сводится к решению дифференциального уравнения [1, с. 6–7]:

$$D \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) = p, \quad (1)$$

где x, y – координаты рассматриваемой точки пластины в выбранной системе координат относительно самой пластины; w – стрелка прогиба пластины; p – распре-

деленная поперечная нагрузка, действующая на поверхность пластины; D – цилиндрическая жесткость пластины, определяемая по формуле (2):

$$D = \frac{Et^3}{12(1 - \mu^2)}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости материала пластины; t – толщина пластины; μ – коэффициент Пуассона материала пластины.

Как правило, решение дифференциального уравнения (1) сводится к решению элементов изгиба в общем (вывод уравнений в функции от координат точек пластины x, y) и частном виде (поиск точек пластины с экстремальными значениями элементов изгиба).

Уравнение (1) представляет собой дифференциальное уравнение четвертого порядка в частных производных, решение которого в общем виде затруднительно. В связи с этим ряд типовых расчетных случаев представлен в виде прикладных, более «упрощенных» формул, позволяющих выполнить расчет пластины в заданном случае нагрузки без особого труда. К таким случаям нагрузки относится в том числе прямоугольная изотропная жесткая пластина с жестко защемленными по периметру кромками и приложенной сосредоточенной силой в центре пластины. Согласно [1, с. 12] прогиб в центре пластины (w) определяется по формуле (3), а максимальный изгибающий момент в середине более длинной стороны (M_{max}) – по формуле (4):

$$w_1 = k_1 \frac{Pb^3}{Et^3}, \quad (3)$$

$$M_{1max} = k_2 Pb, \quad (4)$$

где P – значение сосредоточенной силы; b – короткая сторона пластины; k_1, k_2 – коэффициенты, принимаемые в зависимости от значения соотношения сторон (a, b) рассчитываемой пластины [1, с. 12].

В случае, если коэффициенты k_1, k_2 являются безразмерными, то значение прогиба, получаемое по формуле (3), будет иметь размерность «м²», а изгибающего момента, определяемого по формуле (4) – «Н·м» (в системе СИ). Согласно [1, с. 6] изгибающий момент в теории пластин является удельным – приходящимся на единицу длины срединной плоскости. Таким образом, в системе СИ изгибающий момент должен иметь размерность «Н».

Следовательно, или коэффициенты k_1, k_2 должны иметь размерность «м⁻¹», или формулы (3) и (4) являются ошибочными. На данном этапе принимается, что коэффициенты k_1, k_2 имеют размерность «м⁻¹».

Положим, что рассматривается стальная ($E=2,1 \cdot 10^{11}$ Па, $\mu=0,3$) квадратная ($a=b=0,3$ м) пластина толщиной 8 мм ($t=0,008$ м), жестко защемленная по периметру под действием сосредоточенной силы в центре, равной 20 кН ($P=20\,000$ Н). В таком случае прогиб по центру пластины, определяемый по формуле (3), составит:

$$w = 0,0611 \frac{20000 \cdot 0,3^3}{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,008^3} = 0,000307 \text{ м} = 0,307 \text{ мм},$$

где $k_1=0,0611 \text{ м}^{-1}$ – значение коэффициента при соотношении сторон, равном 1.

Максимальный момент посередине кромки пластины, определяемый по формуле (4), составит:

$$M_{max} = 0,1257 \cdot 20000 \cdot 0,3 = 754,2 \text{ Н},$$

где $k_2=0,1257 \text{ м}^{-1}$ — значение коэффициента при соотношении сторон, равном 1.

Было принято решение выполнить проверку полученного результата с помощью расчета методом конечных элементов (далее – МКЭ) в программном пакете Fidesys.

Результаты расчета прогибов представлены на рис. 1, результат расчета максимального изгибающего момента – на рис. 2. Размер сетки на данных рисунках – 20 мм.

По результатам расчета видно, что прогиб пластины в центре равен 1,043 мм, а максимальный изгибающий момент посередине каждой кромки составляет 2 254 Н (по модулю). Оценка точности полученных результатов проверена анализом сеточной сходимости, представленной в табл. 1.

Таблица 1. Анализ сеточной сходимости

Table 1. Mesh convergence analysis

Размер КЭ, мм	Прогиб в центре пластины		Изгибающий момент по центру кромки пластины	
	Значение, мм	Разница относительно предыдущего шага, %	Значение, Н	Разница относительно предыдущего шага, %
20	1,043	—	2 254	—
10	1,053	0,958	2 362	4,79
5	1,060	0,665	2 430	2,88
2	1,066	0,566	2 472	1,73

В качестве конечного принимается результат, полученный на сетке размером 2 мм, – прогиб в центре пластины 1,066 мм и изгибающий момент по центру кромки пластины 2 472 Н.

Результаты расчета прогиба с помощью МКЭ относительно справочного расчета расходятся практически в 3,47 раза, а по максимальному изгибающему моменту – в 3,28 раза. Аналогичный расчет выполнен для ряда других пластин с иными значениями соотношения сторон, прикладываемой силы и материала пластины, в каждом случае наблюдается существенное расхождение между расчетом согласно [1] и расчетом, выполненном в программном пакете Fidesys. При этом в каждом случае степень расхождения результатов разная.

Учитывая вышеизложенное, представляется, что формулы в [1] являются ошибочными. Таким образом, цель работы – найти истинные формулы для определения прогиба в центре и максимального изгибающего момента посередине длинных сторон прямоугольной изотропной жестко зашечленной по периметру пластины под действием центрально приложенной сосредоточенной силы.

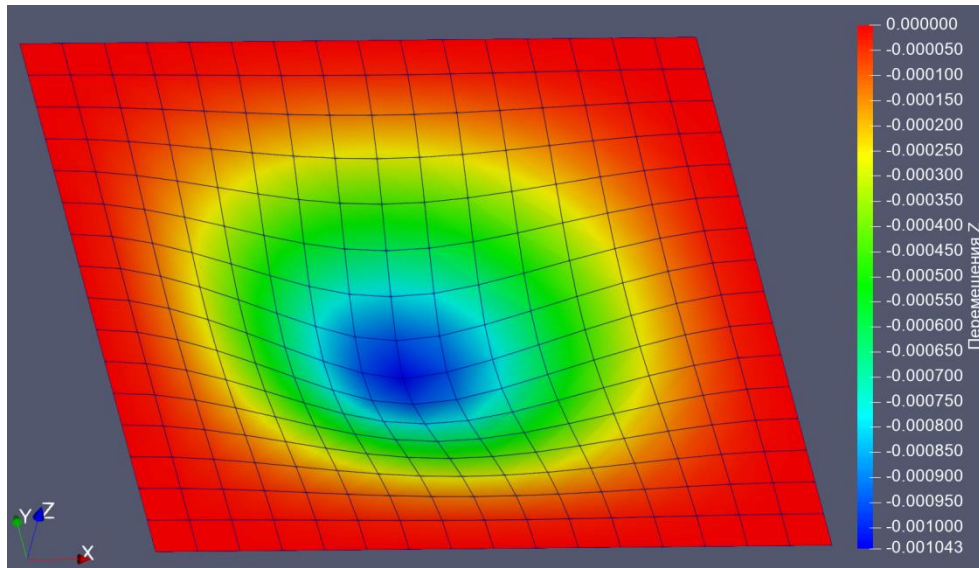


Рис. 1. Перемещения вдоль оси Z (прогиб) пластины под действием
сосредоточенной силы в центре

Fig. 1. Displacements along the Z axis (deflection) of the plate under the action
of a concentrated force at the center

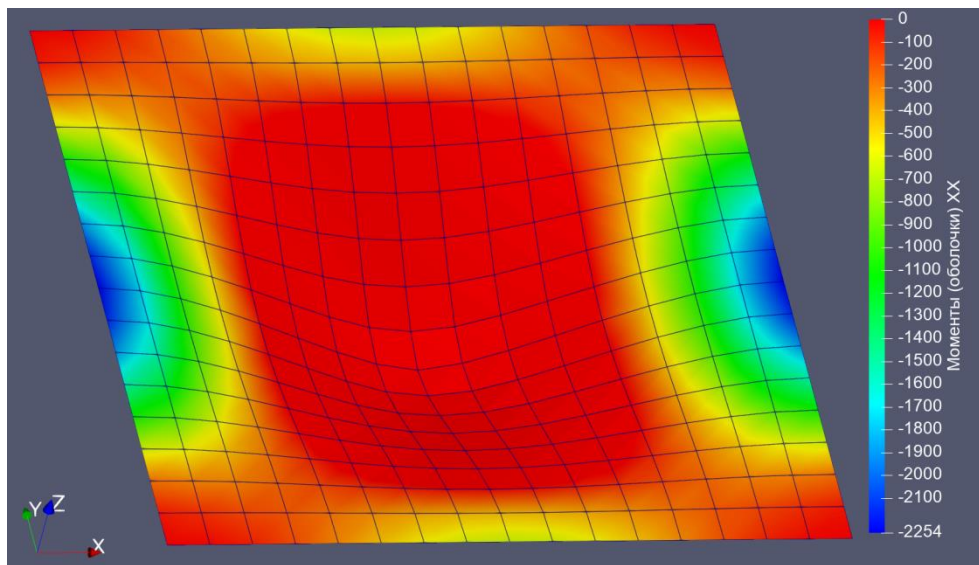


Рис. 2. Результат расчета изгибающего момента в квадратной пластине
под действием сосредоточенной силы относительно оси X

Fig. 2. Calculation result of the bending moment in a square plate under the action
of a concentrated force relative to the X-axis

ПОИСК ИСТОЧНИКОВ С ТРЕБУЕМОЙ РАСЧЕТНОЙ СХЕМОЙ

С целью исключения допущения опечаток в расчетных формулах (3) и (4) по справочнику [1] были предприняты попытки отыскать переработанное переиздание данного справочника, но найти ничего не удалось. В связи с этим принято решение выполнить поиск данной расчетной схемы в других источниках.

Расчетно-теоретический справочник проектировщика [2] включает в себя большое количество расчетных схем пластин, в том числе прямоугольную изотропную пластину на жестко защемленном контуре под действием сосредоточенной нагрузки.

Согласно [2, с. 625] прогиб в центре защемленной пластины определяется по формуле (5), а максимальный изгибающий момент посередине длинной кромки пластины – по формуле (6):

$$w_2 = k_3 \frac{Pb^3}{D}, \quad (5)$$

$$M_{2max} = k_4 P, \quad (6)$$

где k_3, k_4 – коэффициенты, принимаемые в зависимости от значения соотношения сторон (a, b) рассчитываемой пластины [2, с. 625]. Здесь и далее по тексту будет полагаться, что в случае разбора прямоугольной пластины размер « a » – длинная сторона пластины, размер « b » – короткая сторона пластины.

В случае квадратной пластины $k_3=0,0056$, $k_4=0,1257$.

На данном этапе можно отметить, что формулы для расчета максимальных изгибающих моментов отличаются. Формула (4) дополнительно учитывает длину короткой стороны пластины « b », чего не учитывает формула (6).

Для анализа формулы расчета прогибов (3) умножим числитель и знаменатель формулы на $12(1 - \mu^2)$. Получим:

$$w_1 = k_1 \frac{Pb^3}{Et^3} \cdot \frac{12(1 - \mu^2)}{12(1 - \mu^2)} = \frac{Pb^3}{D} \cdot \frac{k_1}{12(1 - \mu^2)}.$$

Для того, чтобы формулы (3) и (5) дали одинаковый результат, необходимо соблюдение равенства (7):

$$k_3 = \frac{k_1}{12(1 - \mu^2)}. \quad (7)$$

Предполагая коэффициент Пуассона равным 0,3, а коэффициент $k_1 - 0,0611$, правая часть уравнения (7) будет выглядеть как:

$$\frac{k_1}{12(1 - \mu^2)} = \frac{0,0611}{12(1 - 0,3^2)} = 0,0056.$$

Полученное значение совпадает со значением коэффициента k_3 , представленным выше, отсюда следует, что формула (5) совпадает с формулой (3). При этом необходимо отметить, что формула для определения прогибов в центре пластины, изложенная в [1], справедлива только для материалов с коэффициентом Пуассона, равным 0,3, что не отмечено в самом источнике.

Справочник [2] был переиздан в 1973 г. [3] с сохранением вышеизложенной расчетной схемы. Согласно [3, с. 51] максимальный изгибающий момент в середине длинной кромки определяется по формуле (6), а максимальный прогиб по центру пластины – по формуле (8):

$$w_3 = \frac{k_5}{10^4} \frac{Pb^2}{D}, \quad (8)$$

где k_5 – коэффициент, принимаемый в зависимости от значения соотношения сторон (a, b) рассчитываемой пластины [3, с. 51] и для квадратной пластины, равный 56.

Таким образом, данная формула отличается от формул (3) и (5) на показатель степени величины b .

В источнике [4] описываются различные расчетные случаи пластин, при этом зачастую с выводом соответствующих преобразованных, более простых уравнений. Согласно [4, с. 224] максимальный прогиб в центре и максимальный изгибающий момент посередине длинной стороны пластины на жестком контуре под действием центрально приложенной сосредоточенной силы определяется по формулам (3) и (6) соответственно.

Обращаясь к зарубежному опыту, стоит упомянуть источник [5], содержащий большое количество расчетных схем балок, пластин и др. Согласно представленной информации [5, с. 509], максимальный прогиб в интересующем расчетном случае определяется по формуле (8). Формула для определения максимального изгибающего момента посередине длинной стороны пластины не представлена, однако имеется формула для расчета нормальных напряжений в данном месте (см. формулу (9)):

$$\sigma_5 = \beta_2 \frac{P}{t^2}, \quad (9)$$

где P – значение сосредоточенной силы; t – толщина пластины; β_2 – коэффициент, принимаемый в зависимости от значения соотношения сторон (a, b) рассчитываемой пластины [5, с. 509]. Для квадратной пластины данный коэффициент равен 0,7542.

В то же время нормальные напряжения на лицевых поверхностях пластины определяются по формуле (10) [1, с. 8]:

$$\sigma_5 = \frac{6M}{t^2}, \quad (10)$$

где M – значение изгибающего момента в пластине.

С учетом формулы (10), из формулы (9) можно получить формулу для определения необходимого изгибающего момента:

$$M_5 = \frac{\beta_2 P}{6} = \frac{0,7542 \cdot P}{6} = 0,1257 \cdot P.$$

Полученное выражение для изгибающего момента соответствует выражению (6).

Книга [6] полностью посвящена расчету различного рода пластин (прямоугольных, круглых, ребристых, кольцевых и пр.). В источнике также имеется рассматриваемая в данной статье расчетная схема [6, с. 347], однако авторы поясняют, что предлагаемые ими формулы подходят только для расчета пластин из материала

с коэффициентом Пуассона 1/6 и коэффициентами соотношения сторон 1,0 и 1,5. Ввиду достаточно ограниченной области применения предлагаемых в источнике формул далее в работе он не рассматривается. Тем не менее стоит отметить, что при расчете максимального прогиба по центру пластины размер стороны пластины в числителе используется с показателем степени 2, а значение изгибающего момента по центру длинной кромки пластины вычисляется перемножением значения прикладываемой нагрузки на определенный числовой коэффициент, что соответствует формулам (6) и (8). Вся представленная информация обобщена и представлена в табл. 2.

Таблица 2. Расчетные формулы для определения прогиба в центре пластины и изгибающего момента по длинной стороне пластины

Table 2. Calculation formulas for determining the deflection at the center of the plate and the bending moment along the long side of the plate

Величина	Максимальный прогиб в центре пластины		Максимальный изгибающий момент в центре длинной кромки пластины	
Формулы	$w = k_1 \frac{Pb^3}{Et^3}$	$w = \frac{k_5 Pb^2}{10 Et^3}$	$M_{max} = k_2 Pb$	$M_{max} = k_4 P$
Источники	[1, 2, 4]	[3, 5]	[1]	[2–5]

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРНОСТЕЙ РАСЧЕТНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Во всех упоминаемых источниках [1–6] размерность коэффициентов $k_1 - k_5$, определяемых в зависимости от отношения сторон рассчитываемой пластины, не указана, это, вероятно, говорит о том, что они являются безразмерными. В таком случае для определения прогиба следует использовать формулу (8), а для определения изгибающего момента – формулу (6), упомянутое выше предположение о размерности данных коэффициентов в виде «м⁻¹» является ошибочным.

АНАЛИЗ НАУЧНОГО ЗАДЕЛА В ЧАСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОРРЕКТНЫХ ФОРМУЛ ДЛЯ РАССМАТРИВАЕМОЙ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ

Дополнительно был выполнен поиск статей и других работ в части расчета рассматриваемой расчетной схемы и определения корректных формул.

В отчете [7] рассматривается вопрос сопоставления решения изгиба равномерно-распределенной нагрузки по всей площади жестко закрепленной пластины с решением от действия сосредоточенной силы в центре, являющейся равнодействующей от распределенной нагрузки. В работе рассмотрено определение изгибающих моментов в пластине, однако никаких расчетных формул не представлено.

Статья [8] посвящена расчету прямоугольных пластин под действием различных нагрузок (в том числе сосредоточенных) с применением разрывных импульсных функций. Показаны результаты расчета прогиба пластин в различных условиях, тем не менее также не представлены конечные расчетные формулы для определения прогибов и изгибающих моментов, однако указано, что полученные

аналитические результаты расчета хорошо коррелируют с результатом расчета методом конечных элементов

В работе [9] изложена схема расчета прямоугольной пластины под действием сосредоточенной силы в ее центре. Предлагаемое авторами решение сводится к использованию метода суперпозиций исправляющих функций в виде гипербола-тригонометрических рядов. Авторы предлагают набор формул, с помощью которых можно определить функцию прогиба пластины и, как следствие, необходимые изгибающие моменты. Данный метод действительно в пределе может дать достаточно точный результат расчета изгиба пластины, но в прикладном смысле труднореализуемый.

Потенциально решение рассматриваемого в статье вопроса могло быть раскрыто в материалах [10–12], однако данные источники относятся к категории депонированных рукописей и не располагаются в открытом доступе.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОРРЕКТНЫХ ФОРМУЛ

Определение корректных формул расчета изгиба выполнено на трех стальных пластинах разных размеров. Информация по расчетным случаям для пластин представлена в табл. 3.

Таблица 3. Информация по расчетным случаям для пластин

Table 3. Information on the design cases for plates

№ расчетного случая	Размеры пластины, мм	Сосредоточенная нагрузка в центре пластины, Н
1	300x300x8	20 000
2	350x250x8	20 000
3	390x300x8	20 000

Расчетный случай № 1 основан на задаче, описанной во введении данной статьи.

Расчетный случай № 2 отличается от расчетного случая № 1 коэффициентом соотношения сторон. Численные коэффициенты, участвующие в расчете максимального прогиба и максимального изгибающего момента, приняты в явном виде из источников при коэффициенте соотношения сторон 1,4.

Расчетный случай № 3 отличается от двух вышеописанных тем, что значения необходимых коэффициентов приняты из справочной информации методом линейной интерполяции, поскольку информация по данным коэффициентам представлена для пластин с соотношением сторон 1,0; 1,2; 1,4; 1,6 и т. д. Выбранный расчетный случай характерен отношением сторон 1,3.

В качестве упругих констант для стали принят коэффициент Пуассона 0,3 и модуль упругости $2,1 \cdot 10^5$ МПа.

Расчет изгиба пластин выполнен 2 способами:

1. С помощью «упрощенных» формул: по формулам (5) и (8) для определения максимального прогиба и по формулам (4) и (6) для определения максимального изгибающего момента по центру длинной кромки пластины;

2. С помощью метода конечных элементов (МКЭ): в системе прочностного анализа Fidesys. Размер сетки во всех расчетах принимался равным 2,0 мм.

Результаты расчета представлены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты расчета пластин на изгиб

Table 4. Results of plate bending calculations

Расчетная характеристика	Метод расчета	Расчетный случай № 1	Расчетный случай № 2	Расчетный случай № 3
Максимальный прогиб в центре пластины, мм	По формуле (5)	0,307	0,219	0,367
	По формуле (8)	1,024	0,876	1,225
	По МКЭ	1,07	0,919	1,28
Максимальный изгибающий момент по центру длинной кромки, Н	По формуле (4)	628	802	928
	По формуле (6)	2514	3208	3094
	По МКЭ	2 436	3 148	3 070

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 5 представлена оценка погрешностей полученных значений прогибов и моментов относительно результатов конечно-элементного анализа в абсолютных значениях в процентах.

Полученные результаты свидетельствуют о следующем:

1. С точки зрения определения максимального прогиба под приложенной сосредоточенной силой в центре прямоугольной и защемленной по периметру пластины формула (8) дает гораздо более точные результаты, чем формула (5). Данный факт свидетельствует о том, что формулы, изложенные в [1], [2] и [4], ошибочны и требуют корректировок;

2. Расчет пластин с коэффициентом сторон, отличающимся от стандартных, представленных в источниках, также дает достоверный результат при определении вспомогательных расчетных коэффициентов методом линейной интерполяции;

3. Расчет максимального изгибающего момента по центру длинной кромки пластины, выполненный по формуле (4), демонстрирует существенную погрешность по сравнению с расчетом по формуле (6).

Таблица 5. Оценка погрешности расчетов (в процентах)

Table 5. Estimate of calculation error (in percent)

Расчетная характеристика	Метод расчета	Расчетный случай № 1	Расчетный случай № 2	Расчетный случай № 3
Максимальный прогиб в центре пластины	По формуле (5)	71,3	76,2	71,3
	По формуле (8)	4,30	4,68	4,30
Максимальный изгибающий момент по центру длинной кромки	По формуле (4)	74,2	74,5	69,8
	По формуле (6)	3,20	1,91	0,78

Таким образом, формулы (3) и (4), изложенные в [1], могут быть использованы в практических расчетах при условии исключения из них множителя b . При этом, как было отмечено выше, формула (3) для определения максимального прогиба в центре пластины справедлива только для материалов с коэффициентом Пуассона 0,3.

Учитывая это, имеется возможность оценить погрешность применения откорректированной формулы для определения прогиба в рассматриваемом расчетном случае из справочника [1] применительно к материалам с коэффициентом Пуассона, отличающимся от 0,3, по формуле (11)

$$\Delta = \frac{w_1 - w_0}{w_0} \cdot 100, \quad (11)$$

где Δ – погрешность применения откорректированной формулы (3); w_1 – прогиб в центре пластины, изготовленной из материала с коэффициентом Пуассона, отличающимся от 0,3; w_0 – прогиб в центре пластины, изготовленной из материала с коэффициентом Пуассона 0,3.

С учетом формул (2), (5) и (7) формулу (11) можно записать в виде формулы (12):

$$\Delta = \left(\frac{1 - \mu_1^2}{1 - \mu_0^2} - 1 \right) \cdot 100, \quad (12)$$

где μ_0 – коэффициент Пуассона, равный 0,3; μ_1 – коэффициент Пуассона, отличный от 0,3.

Результат расчет представлен в виде графика на рис. 3. Значение коэффициента Пуассона принято в диапазоне 0,15 – 0,45. Для данного диапазона погрешность применения даже откорректированной формулы (3) может достигать 13 %.

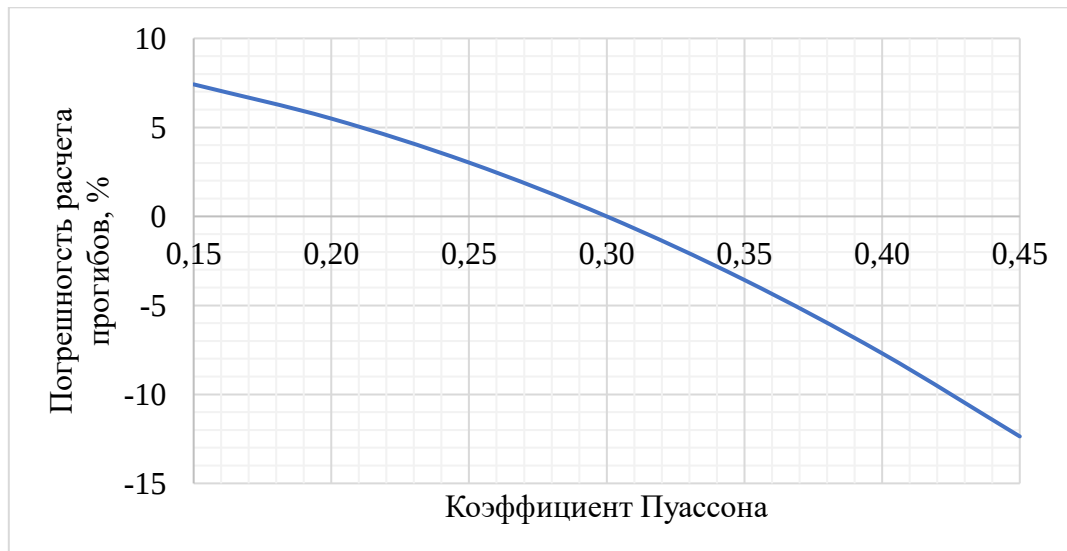


Рис. 3. Погрешность применения откорректированной формулы (3) в зависимости от коэффициента Пуассона материала рассчитываемой пластины

Fig. 3. Error in applying the corrected formula (3) depending on the Poisson's ratio of the material of the calculated plate

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Формулы для расчета изгиба прямоугольной жесткой изотропной пластины, защемленной по периметру под действием сосредоточенной нагрузки в центре, представленные в справочнике по строительной механике корабля [1] – в одном из базовых справочников в данном направлении, – ошибочны и не могут применяться для практических расчетов.

2. Формулы для определения максимального прогиба в центре пластины в том же случае нагружения, согласно справочнику [2] и книги [4], также носят ошибочный характер.

3. Для определения максимального прогиба в центре пластины необходимо использовать формулу (8), а для определения максимального изгибающего момента в центре длинной кромки пластины – формулу (6).

4. Расчетные случаи изгиба пластин, рассмотренные в [1], касаются пластин, выполненных из материала с коэффициентом Пуассона 0,3.

5. Для корректного расчета прямоугольной изотропной жесткой пластины с защемленным периметром и силой, приложенной в центре, необходимо в формулах (3) и (4) исключить множитель b – размер короткой стороны пластины.

6. Применение даже откорректированной формулы (3) из справочника [1] к пластинам, изготовленным из материала с коэффициентом Пуассона, отличающимся от 0,3, может привести к погрешности в определении прогибов по центру пластины свыше 10 %.

Все используемые источники размещены по ссылке в открытом доступе¹.

Список источников

1. Справочник по строительной механике корабля: в 3 т. / под общ. ред. Ю. А. Шиманского. – Ленинград: Государственное союзное издательство судостроительной промышленности, 1958–1960. – Т. 2. – 528 с.

2. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений: расчетно-теоретический / под ред. А. А. Уманского. – Москва: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1960. – 1040 с.

3. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений: расчетно-теоретический: в 2 кн. / под ред. А. А. Уманского. – Москва: Издательство литературы по строительству, 1972–1973. – Т. 2. – 416 с.

4. Тимошенко, С. П. Пластинки и оболочки / С. П. Тимошенко. – Москва, Ленинград: ОГИЗ, Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1948. – 460 с.

5. Young, W. C. Roark's formulas for stress and strain / W. C. Young, R. G. Budynas. – 7th ed. – New York: McGraw-Hill Publ., 2002. – 852 p. – ISBN 0-07-072542-X.

¹ <https://disk.yandex.ru/d/SkQHZvcCkHXKfQ>

6. Вайнберг, Д. В. Расчет пластин / Д. В. Вайнберг, Е. Д. Вайнберг. – Киев: Будівельник, 1970. – 435 с.
7. Косауров, А. П. Анализ и особенности методов при расчете пластин и оболочек на изгиб: отчет / А. П. Косауров, П. В. Тимофеев. – Москва, 2013. – 17 с.
8. Кешишьян, Д. Э. Расчет пластин на действие локальных нагрузок аналитическим методом с применением обобщенных функций / Д. Э. Кешишьян // Молодой ученый. – 2019. – № 48 (286) – С. 57–63.
9. Сухотерин, М. В. Оценка действия сосредоточенной силы на обшивку судна / М. В. Сухотерин, К. О. Ломтева // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2011. – № 1 (9). – С. 43–47.
10. Метод расчета прямоугольных пластин при изгибе сосредоточенными силами. – Текст: электронный // Elibrary: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18298547> (дата обращения: 12.07.2025).
11. Оценка погрешности одного приближенного решения задачи об изгибе прямоугольной пластины. – Текст: электронный // Elibrary: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18298546> (дата обращения: 12.07.2025).
12. Уточнение одного приближенного решения задачи об изгибе и свободных колебаниях защемленной по контуру прямоугольной пластины. – Текст: электронный // Elibrary: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18291752> (дата обращения: 12.07.2025).

References

1. Handbook of Ship Structural Mechanics: in 3 Vols. / ed. by Yu. A. Shimansky. – Leningrad: State Union Publishing House of Shipbuilding Industry, 1958–1960. – Vol. 2. – 528 p.
2. Designer's Handbook for Industrial, Residential and Public Buildings and Structures: Theoretical and Calculational / ed. by A. A. Umansky. – Moscow: State Publishing House of Literature on Construction, Architecture and Building Materials, 1960. – 1040 p.
3. Designer's Handbook for Industrial, Residential and Public Buildings and Structures: Theoretical and Calculational: in 2 Books / ed. by A. A. Umansky. – Moscow: Publishing House of Construction Literature, 1972–1973. – Vol. 2. – 416 p.
4. Timoshenko, S. P. Plates and Shells / S. P. Timoshenko. – Moscow, Leningrad: OGIZ, State Publishing House of Technical and Theoretical Literature, 1948. – 460 p.
5. Young, W. C. Roark's Formulas for Stress and Strain / W. C. Young, R. G. Budynas. – 7th ed. – New York: McGraw-Hill Publ., 2002. – 852 p. – ISBN 0-07-072542-X.
6. Vaynberg, D. V. Plate Analysis / D. V. Vaynberg, E. D. Vaynberg. – Kyiv: Budivelnik, 1970. – 435 p.
7. Kosaurov, A. P. Analysis and Specific Features of Methods for Bending Analysis of Plates and Shells: Report / A. P. Kosaurov, P. V. Timofeev. – Moscow, 2013. – 17 p.
8. Keshishyan, D. E. Analytical Calculation of Plates under Local Loads Using Generalized Functions / D. E. Keshishyan // Young Scientist. – 2019. – № 48 (286). – P. 57–63.

9. Sukhoterin, M. V. Assessment of the Effect of a Concentrated Force on Ship Hull Plating / M. V. Sukhoterin, K. O. Lomteva // Bulletin of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. – 2011. – № 1 (9). – P. 43–47.

10. Method for Calculating Rectangular Plates under Bending by Concentrated Forces. – Text electronic // Elibrary: site. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18298547> (date of treatment: 12.07.2025).

11. Estimation of the Error of an Approximate Solution to the Problem of Bending of a Rectangular Plate. – Text electronic // Elibrary: site. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18298546> (date of treatment: 12.07.2025).

12. Refinement of an Approximate Solution to the Problem of Bending and Free Vibrations of a Rectangular Plate Clamped along the Contour. – Text electronic // Elibrary: site. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18291752> (date of treatment: 12.07.2025).

Информация об авторах

Д. А. Романюта – главный конструктор, заместитель директора научно-образовательного центра судостроения, морской инфраструктуры и техники

А. С. Ариенчук – магистрант 2-го года обучения

Information about the authors

D. A. Romanyuta – Chief Designer, Deputy Director of the Scientific and Educational Center for Shipbuilding, Marine Infrastructure and Technology

A. S. Arienchuk – 2nd year master's student

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article

The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 30.09.2025; одобрена после рецензирования 10.10.2025; принята к публикации 15.10.2025.

The article was submitted 30.09.2025; approved after reviewing 10.10.2025; accepted for publication 15.10.2025.

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор),
Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-47915
от 22.12.2011 г.

Подписной индекс 83871 в Объединенном каталоге «Пресса России»,
цена свободная

Редактор С. В. Супрунова

Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
Лицензия № 05609 от 14.08.2001
Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО «КГТУ»
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
Подписано в печать 27.10.2025. Выход в свет 01.11.2025. Формат 60 x 88 (1/8).
Печ. л. 15,8. Уч.-изд. л. 10,2. Тираж 1000 экз. Заказ № 63.