

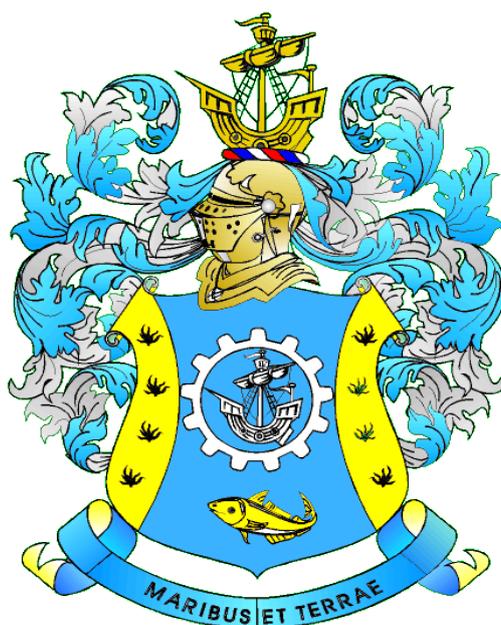
ИЗВЕСТИЯ КГТУ

2023

№ 71

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

«Известия КГТУ»
Учредитель: ФГБОУ ВО
«Калининградский государственный
технический университет»

Научный журнал
Основан в 2002 г.

Редакционный совет:

Главный редактор: Н. А. Кострикова, канд. физ.-мат. наук, доц.
Зам. главного редактора: А. Я. Яфасов, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.

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

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

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

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

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

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

Мирослав Шредер, д-р экон. наук, проф., Гданьский университет (г. Гданьск, Польша), декан факультета управления;

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

Марек Якубовский, д-р техн. наук, проф., Национальный научно-исследовательский институт морского рыболовства (г. Гдыня, Польша), профессор кафедры технологии переработки и механизации.

Редакционная коллегия:

О. В. Агеев, д-р техн. наук, доц.; *И. С. Александров*, д-р техн. наук, доц.;
М. П. Андреев, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.; *О. А. Анциферова*, д-р с.-х. наук,
проф.; *А. Г. Архипов*, д-р биол. наук, доц.; *О. О. Бабич*, д-р техн. наук, доц.;
А. С. Баркова, д-р вет. наук, доц.; *О. М. Бедарева*, д-р биол. наук, проф.;
В. В. Брюханов, д-р физ.-мат. наук, проф.; *Н. Л. Великанов*, д-р техн. наук, проф.;
В. В. Верхотуров, д-р биол. наук, проф.; *А. А. Герасимов*, д-р техн. наук, проф.;
В. И. Гнатюк, д-р техн. наук, проф.; *Е. М. Грамузов*, д-р техн. наук, проф.;
В. В. Дорофеева, д-р экон. наук, проф.; *Л. С. Дышлюк*, д-р техн. наук, доц.;
С. В. Дятченко, д-р техн. наук, доц.; *А. В. Иванов*, д-р экон. наук, проф.;
И. П. Корнева, канд. техн. наук, доц.; *О. В. Кригер*, д-р техн. наук, доц.;
С. Н. Лябзина, д-р биол. наук, доц.; *О. Я. Мезенова*, д-р техн. наук, проф.;
А. Г. Мнацаканян, д-р экон. наук, проф.; *А. Б. Муромцев*, д-р вет. наук, проф.;
Е. Н. Науменко, д-р биол. наук, доц.; *В. А. Наумов*, д-р техн. наук, проф.;
А. И. Притыкин, д-р техн. наук, доц.; *Л. И. Сергеев*, д-р экон. наук, проф.;
Н. Я. Синявский, д-р физ.-мат. наук, проф.; *В. А. Слежкин*, канд. хим. наук, доц.;
А. В. Снытников, д-р техн. наук, проф.; *Т. Е. Степанова*, д-р экон. наук, проф.;
В. И. Сутырин, д-р техн. наук, доц.; *А. Б. Тристанов*, канд. техн. наук, доц.;
Е. В. Ульрих, д-р техн. наук, доц.; *Ю. А. Фатыхов*, д-р техн. наук, проф.;
С. В. Федоров, д-р техн. наук, проф.; *С. В. Шибаетов*, д-р биол. наук, проф.;

Выпускающий редактор С. В. Супрунова

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»,
2023



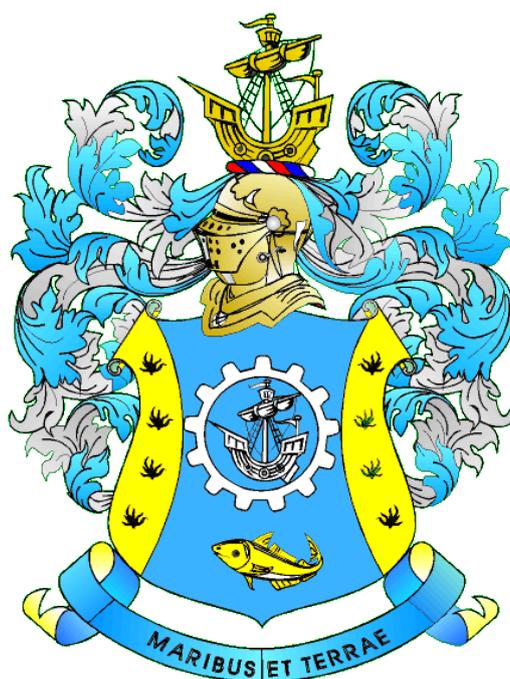
KSTU NEWS

2023

№ 71

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>Матросова С. В., Лябзина С. Н., Горбач В. В., Ильмаст Ю. Н.</i> Оценка эффективности кормления радужной форели (<i>Oncorhynchus mykiss</i>) диетой на основе личинки черной львинки	11
<i>Моисеева А. И.</i> Структура микробного сообщества пруда Верхнего (г. Калининград)	24
<i>Перервенко О. В., Клочкова Н. Г.</i> Модуляция фагоцитарной активности нейтрофилов водными экстрактами <i>Arthrothamnus bifidus</i> и <i>Laminaria repens</i> (Laminariales, Ochrophyta)	38
<i>Севостьянова Е. А., Меньшенин А. С., Казимирченко О. В., Цупикова Н. А., Суэтина О. С.</i> Экологическое состояние пруда Шенфлиз как пример характеристики водоема карьерного типа в условиях рекреационной нагрузки	56

Техника и технология пищевых производств

<i>Александров Н. К., Альшевский Д. Л.</i> Научное обоснование технологических параметров и рецептуры белкового наполнителя из коллагенсодержащих отходов переработки карпа	73
<i>Баженов Е. А., Байдалинова Л. С., Волков В. В., Гримм Т.</i> Опыт получения пептидов с низкой молекулярной массой из различных видов вторичного рыбного сырья	84

Судостроение, машиностроение и энергетика

<i>Белей В. Ф., Коротких К. В.</i> Оценка влияния частотно-регулируемых асинхронных электроприводов на функционирование судовых энергетических установок и их элементов	105
<i>Белоусов В. А., Дятченко С. В.</i> Влияние модернизации оконечностей корпуса парома на мореходные качества	117
<i>Сынашенко О. В., Синявский Н. Я., Кострикова Н. А.</i> Анализ судовых моторных масел с помощью релаксации диэлектрической проницаемости	131

Естественные и математические науки

<i>Чечко В. А., Топчая В. Ю.</i> Многолетняя динамика состава верхнего слоя донных отложений в неглубоком водоеме лагунного типа (на примере Калининградского залива Балтийского моря)	147
--	-----

CONTENT

Biology, ecology and fisheries

<i>Matrosova S. V., Lyabzina S. N., Gorbach V. V., Il'mast Yu. N.</i> Evaluation of the feeding efficiency of rainbow trout (<i>Oncorhynchus mykiss</i>) with a diet based on black soldier fly larvae	11
<i>Moiseeva A. I.</i> Structure of the microbial community of the Verkhniy pond (Kaliningrad)	24
<i>Perervenko O. V., Klochkova N. G.</i> Modulation of phagocytic activity of neutrophils with aqueous extracts of <i>Arthrothamnus bifidus</i> and <i>Laminaria repens</i> (Laminariales, Ochrophyta)	38
<i>Sevostyanova E. A., Menshenin A. S., Kazimirchenko O. V., Tsupikova N. A., Suetina O. S.</i> The ecological state of the Schoenflies pond as the example of a quarry-type reservoir's description under conditions of recreational load	56

Processes and technology of food manufacturing

<i>Aleksandrov N. K., Alshevskiy D. L.</i> Scientific substantiation of technological parameters and recipe of protein filler from collagen-containing carp processing wastes	73
<i>Bazhenov E. A., Baydalinova L. S., Volkov V. V., Grimm T.</i> Experience of obtaining peptides with low molecular weight from various types of secondary fish raw materials	84

Shipbuilding, machine manufacturing and power engineering

<i>Beley V. F., Korotkikh K. V.</i> Assessing the influence of frequency-controlled asynchronous electric drives on the operation of ship power plants and their elements	105
<i>Belousov V. A., Dyatchenko S. V.</i> Influence of modernization of the ends of the ferry hull on seaworthiness	117
<i>Synashenko O. V., Sinyavsky N. Ya., Kostrikova N. A.</i> Analysis of marine motor oils using dielectric permittivity relaxation	131

Natural and mathematical sciences

<i>Chechko V. A., Topchaya V. Yu.</i> Long-term dynamics of the composition of the upper layer of bottom sediments in a shallow lagoon-type basin (the example of Kaliningrad Bay in the Baltic Sea)	147
--	-----

БИОЛОГИЯ, ЭКОЛОГИЯ И РЫБНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Научная статья

УДК 639.2

DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-11-23

**Оценка эффективности кормления радужной форели
(*Oncorhynchus mykiss*) диетой на основе личинки черной львинки**

Светлана Владимировна Матросова¹, Светлана Николаевна Лябзина², Вячеслав Васильевич Горбач³, Юлия Николаевна Ильмаст⁴

^{1,2,3,4} Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия

¹ matrosovsv@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0093-704X>

² slyabzina@petsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3386-5724>

³ <https://orcid.org/0000-0003-2326-8539>

Аннотация. Традиционными источниками белка в кормах для аквакультуры являются рыбная мука и соя, но доступность этих компонентов становится ограниченной из-за постепенного истощения запасов Мирового океана. С этой точки зрения насекомые могут быть ценным источником протеина как альтернативный белок для аквакультуры. В России личинок тропической мухи *Hermetia illucens* L. чаще используют для получения биогазуса после переработки пищевых отходов, но в последние годы становится популярным направление культивирования личинок для изготовления рыбных комбикормов. В связи с этим, настоящее исследование было направлено на оценку влияния замены части рыбной муки личинками черной львинки в рационе годовиков радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*). По результатам изучения показателей эффективности роста радужной форели, выращенной на производственных кормах с добавлением личинок черной львинки в виде подготовленного кормового субстрата из замороженных насекомых и пшеничного глютена через экструдер, описано влияние экспериментальной диеты с положительным рыбоводно-биологическим эффектом. Специально для проведения эксперимента было разработано два рецепта комбикормов (для опытной и контрольной групп), в одном из которых часть рыбной муки заменили на личинку *H. illucens*. Эксперимент проводился на генетически однородных группах рыб в условиях содержания в системе замкнутого водоснабжения в течение 77 суток. Для индивидуального контроля биометрических и морфологических параметров каждой рыбе был введен микрочип в область спинного плавника. Оценка показателей абсолютного и относительного приростов в контрольной и опытной группах рыб позволила выявить, что наличие личинки в составе кормов способствовало наибольшей активности ростовых процессов у форели. Величина относительного прироста массы рыб в опытной группе выше на 13 %, чем в контрольной. Различия между средними арифметическими становятся очевидными на 50-е сутки с начала эксперимента и достигают максимума к его окончанию.

Ключевые слова: аквакультура, черная львинка, радужная форель, корма для рыб, хитин.

Финансирование: Исследования, описанные в данной работе, были проведены в рамках реализации Программы поддержки НИОКР студентов, аспирантов и лиц, имеющих ученую степень, финансируемой Правительством Республики Карелия.

Для цитирования: Матросова С. В., Лябзина С. Н., Горбач В. В., Ильмаст Ю. Н. Оценка эффективности кормления радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*) диетой на основе личинки черной львинки // Известия КГТУ. 2023. № 71. С. 11-23. DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-11-23

Original article

Evaluation of the feeding efficiency of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) with a diet based on black soldier fly larvae

Svetlana V. Matrosova¹, Svetlana N. Lyabzina², Vyacheslav V. Gorbach³, Yulia N. Il'mast⁴

^{1,2,3,4} Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia

¹ matrosovasv@yandex.ru

² slyabzina@petrsu.ru

Abstract. Traditional sources of protein in aquaculture feeds are fishmeal and soy, but availability of these components is becoming limited due to the gradual depletion of the World's oceans. From this point of view, insects can be a valuable source of protein as an alternative protein for aquaculture. In Russia, larvae of the tropical fly *Hermetia illucens* L. are more often used to obtain vermicompost after food waste conversion, however recently the cultivation of larvae for the production of fish feed has become more popular. Therefore, the investigation aimed to evaluate the replacement of fishmeal with the larvae in the diet of yearling rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Based on the results of a study investigating the growth efficiency of rainbow trout raised on a commercial feed supplemented with black soldier fly larvae, it was observed that an experimental diet containing frozen insects and wheat gluten processed using an extruder had a positive impact on fish farming and biological effects. Especially for the experiment, two feed recipes have been developed (for the experimental and control groups), in one of which the fish meal has been replaced with *H. illucens* larvae. The experiment was conducted on genetically homogeneous groups of fish that were kept in a closed water supply system for 77 days. For individual control of biometric and morphological parameters, a microchip was placed into each fish in the dorsal fin area. The relative increase in fish weight in the experimental group was 13% higher than in the control group. The differences between the arithmetic means become obvious on the 50th day from the beginning of the experiment and reach a maximum towards its end.

Keywords: aquaculture, black soldier fly, rainbow trout, fish food, chitin.

Funding: The research described in this publication was made possible in part by R&D Support Program for undergraduate and graduate students and postdoctoral researcher of PetrSU, funded by the Government of the Republic of Karelia.

For citation: Matrosova S. V., Lyabzina S. N., Gorbach V. V., Ilmast Yu. N. Evaluation of the feeding efficiency of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) with a diet based on black soldier fly larvae // *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2023; (71):11-23. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-11-23

ВВЕДЕНИЕ

Современное рыбоводство неразрывно связано с новыми технологиями, обеспечивающими высокий уровень производства, и одним из таких направлений является разработка рецептур кормов с заменой рыбной муки на альтернативные источники белка. При выращивании ценных пород рыб в искусственных условиях до сих пор главным компонентом для изготовления кормов остается высокая потребность в рыбной муке. Традиционно ее производят из промысловой рыбы, ежегодно используя около 85 % биоресурсов Мирового океана, что приводит к катастрофическому сокращению запасов [1].

В последнее время в аквакультуре лососевых рыб для производства кормов все чаще заменяют рыбную муку на концентраты растительных белков, белковые гидролизаты животного происхождения или муку из насекомых. Во многих странах мира использование двукрылых личинок тропической мухи черной львинки (*Hermetia illucens* Linnaeus, 1758) зарекомендовало себя как отличный ингредиент комбикормов и источник питательных веществ (аминокислот) в кормлении животных. На территории Российской Федерации применение комбикормов на основе личинок львинки в продуктивном животноводстве также показывает успешный результат по ключевым параметрам роста и увеличению живой массы практически у всех сельскохозяйственных животных [2, 3]. В рыбоводстве использование этих личинок, несомненно, улучшит продуктивные показатели рыб при выращивании в искусственных условиях. Это подтверждается положительными результатами использования протеин-хитинового концентрата из личинок черной львинки при кормлении атлантического лосося (*Salmo salar*) и красной тиляпии (*Oreochromis mossambicus* и *O. niloticus*) [4, 5].

В рационе дикой форели в природных бассейнах естественной пищей являются личинки практически всех водных насекомых, на которых она способна активно развиваться и набирать вес. Таким образом, для аквакультурной форели при индустриальном выращивании также не исключается возможность использовать насекомых в их рационе питания. Кроме того, по сравнению с другими источниками животного белка, личинки двукрылых не уступают по качеству аминокислотного состава и питательных веществ альтернативным компонентам кормов [6]. Эти насекомые обладают хорошей энергетической ценностью, поскольку содержат высокий уровень белков – 40–45 %, жиров – 30–35 %, а также богаты витаминами и минералами [7, 8]. Применяемых личинок черной львинки можно легко культивировать в лабораторных (или промышленных) условиях на разных пищевых субстратах [9, 10].

В связи с этим становятся актуальными исследования влияния данного кормового продукта на продуктивные показатели ценных пород рыбы. Настоящее исследование направлено на изучение влияния диеты на основе личинок черной

львинки на рыбоводно-биологические показатели радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*).

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальную часть проводили на базе научно-исследовательского центра по аквакультуре в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Петрозаводский государственный университет» (ПетрГУ) в 2022 г. В качестве объекта для тестирования использовали годовиков радужной форели *Oncorhynchus mykiss* (1+) массой 786–820 г. Две группы рыб по 18 особей содержали в одинаковых условиях в бассейнах объемом 2,7 м³ с общим биофильтром, но разными условиями питания. Контрольной группе рыб предлагался производственный корм для форели по оптимальному рецепту, опытной – производственный корм с добавлением личинок черной львинки, выращенной на растительном субстрате.

Опытный и контрольный корм были изготовлены на производственной линии комбикормового завода в г. Калининграде. Компонентный состав кормов и подбор рецептуры разрабатывался по индивидуальному рецепту, учитывая потребности данной возрастной группы форели. В состав рецептуры опытного образца корма для форели были введены замороженные личинки тропической мухи в виде подготовленного кормового субстрата, пропущенного через экструдер с пшеничным глютенем. Кроме того корм содержал следующие компоненты: рыбную и кровяную муку, гидролизованное перо, концентрат соевого белка, соевый шрот, глютен пшеничный, мука зародышей пшеницы, премикс, бентонит и личинка черной львинки. В опытном образце корма произведена замена рыбной муки за счет добавления личинок черной львинки, составляя в общем 11 %. Рецепт корма для контрольной группы включал тот же набор компонентов, но без добавления личинок насекомых. Питательный состав испытываемых кормов был сбалансирован по физиологическим, биологическим и энергетическим потребностям рыб. Уровень сырого протеина в корме составлял не менее 48 %, сырого жира – не менее 17 %, углеводов – не менее 11%, количество перевариваемой энергии – 18 Мдж/кг.

На момент начала эксперимента форель была хорошо адаптирована к условиям содержания в установке замкнутого водоснабжения (УЗВ). Опытная партия форели в течение 3-х дней переводилась на новый корм методом дробного кормления, что составляло от суточной нормы в первый день 25 %, во второй – 50, третий – 75. Кормление рыбы происходило 2 раза в сутки. Норма кормления рассчитывалась с учетом энергетической питательности экструдированных кормов в зависимости от температуры воды и массы рыб. Продолжительность эксперимента составила 77 дней.

С целью учета индивидуальных биометрических и морфологических параметров каждой рыбе был введен микрочип «CetTag S14» (1,4*8 мм. «FDX-B», производитель «ISBC Group», Россия) подкожно-внутримышечно в область спинного плавника, чуть выше средней линии. Микрочип вместе с многовитковой антенной заключены в специальную капсулу размером 1,4 x 8 мм, выполненную из биосовместимого стекла с антимиграционным покрытием, исключая аллергическую реакцию, отторжение или перемещение (миграцию) под кожей живот-

ного. Каждый микрочип помещен в одноразовый шприц для введения и представляет собой приемник, передатчик и блок памяти для хранения кода.

Измерения в контрольной и опытной группах рыб проводили каждые 14 дней (35-й, 50-й, 64-й и 77-й день) после периода адаптации к условиям питания в течение месяца. Для выполнения измерения промеров массы и длины тела рыбу подвергали легкой анестезии с помощью гвоздичного масла (0,1 мл/л, 30 сек), которую часто применяют в аналогичных работах. При определении рыбопродуктивных биологических показателей (рост, вес) использовали формулы абсолютного (A) и относительного (K) приростов:

$$A = W_1 - W_0$$

$$K = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100 \%$$

где W_1 – конечная масса рыб, W_0 – начальная масса рыб.

Под абсолютным приростом понимают увеличение живой массы за определенный промежуток времени, выраженное в граммах. Относительный прирост отражает темп роста рыб и показывает отношение абсолютного прироста живой массы к первоначальной, выраженное в процентах.

Условия содержания рыбы в бассейнах контролировались с помощью программно-аппаратного комплекса «Fish Grow Platform» * (ООО «Интернет-бизнес-системы» ПетрГУ), позволяющего регистрировать основные гидрохимические параметры. По рекомендациям авторов [11] для благоприятного содержания рыбы в бассейнах особенно необходимо контролировать в воде содержание аммиака, уровень нитритов и нитратов, которые сильно подвержены изменениям за счет метаболических процессов рыб при кормлении. В условиях эксперимента основные гидрохимические параметры (рН, $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$, NO_2^- , NO_3^-) находились в пределах нормы, что свидетельствует о хорошей работе биофильтра в УЗВ (табл. 1).

Таблица 1. Гидрохимические параметры
 Table 1. Hydrochemical parameters

Показатель	t, °C	Индикатор рН	Общий аммиак ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$, мг/л)	Нитриты (NO_2^-), мг/л	Нитраты (NO_3^-), мг/л	Кислород (O_2), мг/л
Среднее значение в бассейнах	17,8 ± 0,1	6,26 ± 0,04	0,006	0,01	5,00 ± 1,5	8,75 ± 0,1
Нормативное значение (ОСТ 15.372-87)	14–20	6–8	Не более 0,1	Не более 0,2	Не более 45,0	Не менее 8

Температура воды в бассейнах была постоянной и регулировалась кондиционированием воздуха в помещении УЗВ, водородный показатель поддерживался автоматическим внесением бикарбонатной буферной системы рН-плюс «Аqua-

леон». Насыщение воды кислородом и поддержание его концентрации на необходимом уровне обеспечивалось компрессорной системой «VARP» («Beta» 165×300).

Распределение массы тела рыб по каждому контрольному периоду в опытной и контрольной группах проверяли на нормальность критерием Лиллиефорса (L). Диапазоны варьирования параметров соответствующих эмпирических распределений оценивали простым непараметрическим бутстрепом с числом испытаний $B = 1000$. Доверительные интервалы устанавливали методом процентилей [12]. Поскольку во всех случаях эмпирические частоты соответствуют нормальному распределению ($L < 0,128$, $p > 0,0149$), для попарного сравнения выборок использовали параметрические критерии – Стьюдента (t) и Фишера (F). Динамику роста массы тела рыб (W , г) со временем от начала эксперимента (T , дни) описывали экспоненциальной моделью $W = b \exp(a T)$. Модельные параметры имеют биологический смысл: коэффициент b фиксирует начальную среднюю массу тела рыбы, параметр a – скорость ее роста. Для корректного сравнения скоростей в контроле и опыте приняли $b = \text{const}$. Скорости роста a сравнивали с помощью рандомизационного теста (MCR – Monte Carlo Randomization) с $B = 1000$. Значимость отличий p при таком подходе представляет собой скорректированную долю нуль-модельных комбинаций (эмпирическая разность значений коэффициента a не больше рандомизированной $|d_{\text{obs}}| \leq |d_{\text{ran}}|$) от общего числа испытаний B . Критической величиной для p принято стандартное значение $\alpha = 0,05$. Данные обрабатывали в среде MS Excel и R 4.0.1 с использованием базовых функций и функций пакета «Nortest» [13, 14].

В ходе эксперимента в опытной и контрольной группах наблюдалось увеличение веса радужной форели при выбранном режиме кормления. Результаты сравнения массы тела рыб в контроле и опыте указывают на значимый положительный эффект использования черной львинки в качестве корма. Более интенсивный рост веса рыбы при питании кормом на основе личинок черной львинки по сравнению с контрольными образцами подтверждается значениями описательной статистики.

При кормлении радужной форели диетой на основе личинки черной львинки рассматриваемые рыбоводно-биологические показатели имели значения выше, чем в контрольной группе (табл. 2). Рыба показывала хорошие результаты прироста с нулевым отходом за весь период исследования.

Таблица 2. Рыбоводно-биологические показатели радужной форели ($n = 18$)
Table 2. Fish breeding and biological indicators of rainbow trout ($n = 18$)

Показатели	Опыт	Контроль
Средняя масса в начале выращивания, г	748	718
Средняя масса в конце выращивания, г	1224	1079
Абсолютный прирост массы за период, г	476,00	361,00
Относительный прирост массы за период, %	63,6	50,3
Кормовой коэффициент (КК)	0,87	0,97
Отход рыб за период эксперимента, шт.	0,0	0,0

Относительный прирост массы рыб в опытной группе составил 63,6 %, что выше более чем на 13 % (табл. 2). Следовательно, использование личинок черной львинки в рационе форели способствует более интенсивному набору живой массы рыб при меньшем расходе кормов.

Результаты сравнения массы тела рыб в контроле и опыте указывают на значимый положительный эффект использования черной львинки в качестве корма (табл. 3).

Таблица 3. Изменение массы тела особей (g) в ходе эксперимента
 Table 3. Change in body weight of individuals (g) during the experiment

Показатели	Время с начала эксперимента, дни				
	1	35	50	64	77
Контроль, $n = 18$					
<i>lim</i>	483–914	546–1072	534–1073	610–1230	681–1305
<i>M</i>	718 (657–776)	834 (761–904)	906 (830–974)	1007 (921–1083)	1079 (995–1156)
<i>S</i>	131 (82–159)	158 (102–191)	161 (101–200)	183 (105–231)	180 (95–230)
Опыт, $n = 18$					
<i>lim</i>	450–941	657–1212	825–1225	951–1427	1013–1549
<i>M</i>	748 (673–816)	920 (845–996)	1139 (1064–1219)	1019 (948–1089)	1224 (1143–1311)
<i>S</i>	143 (69–187)	154 (93–194)	139 (92–162)	150 (100–183)	162 (104–202)
<i>t</i>	0,617	1,548	2,087	2,175	2,356
<i>p</i>	0,542	0,132	0,045	0,038	0,025

Обозначения: n – число рыб в выборках; *lim* – диапазон варьирования массы тела; *M* – средняя арифметическая; *S* – стандартное отклонение, в скобках указаны диапазоны варьирования показателей, полученные методом бутстрепа; *t* – критерий Стьюдента; *p* – значимость различий средних арифметических между контролем и опытом для соответствующих периодов, значимые различия выделены полужирным шрифтом, дисперсии во всех случаях однородны (критерий Фишера, $F < 1,481$, $p > 0,478$).

Различия между средними арифметическими увеличиваются во времени, становясь очевидными на 50-й день с начала эксперимента и достигая максимума к его окончанию. При этом использование корма с львинкой не приводит к существенному увеличению изменчивости массы тела рыб, которое можно было бы ожидать из-за неоднородной адаптивной реакции рыб на новый корм. Даже, наоборот, на 50-й день и далее в опыте имело место сужение диапазона варьирования. Наблюдаемые различия стандартных отклонений ни в одном случае не подтверждаются статистически (критерий Фишера, $F < 1,481$, $p > 0,478$).

Согласно экспоненциальным моделям, рыбы в опыте набирали массу быстрее, чем в контроле (рис. 1, табл. 4).

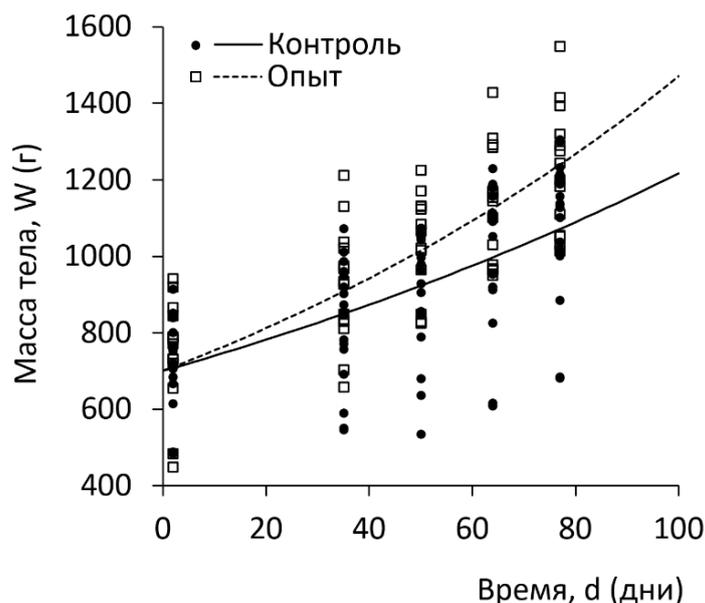


Рис. 1. Динамика роста форели в эксперименте. Маркерами указана масса тела особей в контроле и опыте, линиями – соответствующие экспоненциальные тренды, параметры моделей даны в табл. 4

Fig. 1. Growth dynamics of trout in the experiment. The markers indicate the body weight of individuals in the control and experiment, the lines indicate the corresponding exponential trends, the parameters of the models are given in table 4

Таблица 4. Параметры экспоненциальной модели роста форели в эксперименте, $W = 700 \exp(a T)$

Table 4. Parameters of the exponential trout growth model in the experiment, $W = 700 \exp(a T)$

Модель	a	t	p	R^2	lim
Контроль	0,0055	17,22	<0,001	0,384	0,0049 – 0,0061
Опыт	0,0074	25,20	<0,001	0,562	0,0069 – 0,0082

Обозначения: W – масса тела особи (г); T – число дней с начала эксперимента; a – средняя скорость роста особи; t – значение критерия Стьюдента; p – значимость отличия коэффициента a от нуля; R^2 – коэффициент детерминации; lim – интервалы варьирования коэффициента a , полученные методом бутстрепа.

Доверительные интервалы скоростей роста a не перекрываются, указывая на значимые различия этих модельных параметров (MCR-тест: $p = 0,010$). Большое значение коэффициента детерминации R^2 в опыте является индикатором уменьшения изменчивости массы тела рыб вследствие ослабления влияния на рост особей неконтролируемых, случайных факторов.

Наличие нативной личинки в опытном корме, содержащей хитиновые оболочки, оказывает положительное влияние на накопление массы форели в опытной группе. Хитин как основной компонент покровных тканей насекомых обязательно присутствует и в наружном покрове личинок. Он способен расщепляться, перевариваться и усваиваться в желудке лишь некоторых видов рыб, которые имеют особые ферменты – гликозидазы. Однако рядом авторов обсуждается, что исполь-

зование насекомых в качестве замены рыбной муки или рыбьего жира в кормовых рационах рыб имеет отрицательные эффекты воздействия ввиду наличия хитина и высокого содержания насыщенных жирных кислот, что приводит к снижению усвояемости [16, 17]. Для лососевых рыб характерно присутствие в желудочном соке важных ферментов, таких как хитиназа, лизоцим, амилаза, гиалуронидаза, осуществляющих гидролиз гликозидных связей полисахаридов. Хитиназа разрушает экзоскелет насекомого и усиливает пищеварительную активность. Имеются экспериментальные данные, что у радужной форели степень перевариваемости жира и хитинсодержащих компонентов выше, чем у тиляпий [15] и других видов рыб [5].

Более интенсивное накопление массы радужной форели в опытной группе, вероятно, связано с питательной ценностью хитина черной львинки, который проявляется как дополнительный источник аминного азота и не препятствует пищеварению радужной форели. При этом наличие хитина личинок насекомых в опытном комбикорме не приводит к предполагаемому снижению массы мышечной ткани рыб по окончании экспериментального кормления.

В связи с тем, что потребность рыбы в белке меняется в процессе жизненного цикла, ожидается, что применение личинок черной львинки в комбикормах для форели раннего возраста (0+) как дополнительного источника аминокислот приведет к более интенсивному накоплению массы. Молодые особи способны эффективно расходовать протеин на пластический обмен, а с возрастом он в большей степени расходуется на энергетические потребности организма рыб [18]. Таким образом, при полном цикле выращивания радужной форели целесообразнее использовать пищевой потенциал черной львинки в стартовых кормах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сделать вывод о положительном влиянии продукционных комбикормов с личинками черной львинки *Hermetia illucens* на эффективность роста радужной форели после 50-ти дней кормления (критерий Фишера, $F < 1,481$, $p > 0,478$). Питание кормом, содержащим 11 % личинок, не оказывает негативного влияния на рыбоводно-биологические показатели при выращивании годовиков форели в условиях УЗВ. Оценка эффективности кормления радужной форели диетой на основе личинки черной львинки показала хороший результат по приростам. Высокая степень достоверности полученных результатов подтверждает возможность использования личинок черной львинки как альтернативную замену белка животного происхождения в кормах для радужной форели. Предполагается, что применение личинок в кормовых рационах будет способствовать сокращению затрат при производстве кормов и интенсификации форелеводства, что будет способствовать устойчивому развитию отрасли аквакультуры.

Список источников

1. Лагуткина Л. Ю. Перспективное развитие мирового производства кормов для аквакультуры: альтернативные источники сырья // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2017. № 1. С. 67–78.

2. Минияров Ф. Т. Ресурсосберегающие биотехнологии по использованию насекомых // Естественные науки: актуальные вопросы и социальные вызовы: материалы Международной научно-практической конференции. Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2020. С. 82–84.
3. Романенко Е. А. Качество пищевых яиц при использовании кормового белка из личинок мух черная львинка (*Hermetia illucens*) // Sciences of Europe. 2021. № 85 (2). С. 3–5.
4. Lock E. R., Arsiwalla T., Waagbø R. Insect larvae meal as an alternative source of nutrients in the diet of Atlantic salmon (*Salmo salar*) postsmolt // Aquaculture nutrition. 2016. V. 22. N 6. P. 1202–1213.
5. Использование протеин-хитинового концентрата личинок черной львинки (*Hermetia illucens*) в рационе всеядных рыб на примере красной тиляпии / Н. А. Ушакова, С. В. Пономарев, Ю. В. Федоровых, А. И. Бастраков // Известия Уфимского научного центра РАН. 2018. № 3. С. 57–62.
6. Nutritional composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupae reared on different organic waste substrates / T. Spranghers, M. Ottoboni, C. Klootwijk, A. Ouyun, S. Deboosere, B. Meulenaer, J. Michiels, M. Eeckhout, P. De Clercq, S. De Smet // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2017. V. 97. P. 2594–2600. DOI: 10.1002/jsfa.8081.
7. Dried *Hermetia illucens* larvae meal as a supplement for swine / G. L. Newton, C. V. Booram, R. W. Baker, O. M. Hale // Journal of Animal Science. 1977. V. 44. N 3. P. 395–400.
8. Black soldier fly larvae meal can replace fish meal in diets of sea-water phase Atlantic salmon (*Salmo salar*) / I. Belghit, N. Liland, P. Gjesdal, I. Biancarosa, E. Menchetti, Li Yanxian, R. Waagbø, A. Krogdahl, E. Lock // Aquaculture. 2018. V. 503. P. 609–619. DOI:10.1016/j.aquaculture.2018.12.032
9. Evaluating the growth and development of black soldier fly (BSF) (*Hermetia illucens* (L.) Diptera Stratiomyidae) larvae reared on different agricultural waste materials // F. Mohd Rasdi, A. Razali Ishak, P. Wee Hua, S. Norashikin Mohd Shaifuddin, N. Che Dom, F. Ayuni Shafie, A. Mujid Abdullah, Z. Abdul Kari, H. Atan Edinur // Serranga. 2023. V. 289. N 1. P. 55–68.
10. Growth and Development of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens* (L.), Diptera: Stratiomyidae) Larvae Grown on Carbohydrate, Protein, and Fruit-Based Waste Substrates / F. Mohd Rasdi, A. Razali Ishak, P. Wee Hua, S. Norashikin Mohd Shaifuddin, N. Che Dom, F. Ayuni Shafie, A. Mujid Abdullah, Z. Abdul Kari, H. Atan Edinur // Malaysian Applied Biology. 2022. V. 51. N 6. P. 57–64. DOI: 10.55230/mabjournal.v51i6.2386.
11. Барулин Н. В. Аквакультура ценных видов рыб и ресурсосберегающие технологии. Горки: БГСХА, 2018. Ч. 1. 237 с.
12. Шитиков В. К., Розенберг Г. С. Рандомизация и бутстреп: статистический анализ в биологии и экологии с использованием R. Тольятти: Кассандра, 2013. 314 с.
13. Gross J., Ligges U. Package ‘nortest’: Tests for Normality. Ver. 1.0-4 (2022–10–13). URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/nortest/nortest.pdf> (дата обращения: 10.04.2023).

14. R Core Team, 2020. R: a language and environment for statistical computing. R version 4.0.1. (2020–06–06). Vienna: R Foundation for Statistical Computing. URL: <http://www.r-project.org/> (дата обращения: 14.05.2021).
15. Физиологические основы питательной ценности концентрата личинок *Hermetia illucens* в рационе рыб / Н. А. Ушакова, С. В. Пономарев, Ю. В. Федоровых, А.И. Бастраков, Д.С. Павлов // Известия Академии наук СССР. Серия биологическая. 2020. № 3. С. 293–300.
16. Review on the use of insects in the diet of farmed fish: Past and future/ M. Henry, L. Gasco, G. Piccolo, E. Fountoulaki // Animal Feed Science and Technology. 2015. V. 203. P. 1–22.
17. A six-months study on Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) based diets in zebrafish / M. Zarantoniello, B. Randazzo, C. Truzzi, E. Giorgini, C. Marcellucci, J. Vargas-Abúndez, A. Zimbelli, A. Annibaldi, G. Parisi, F. Tulli, P. Riolo, I. Olivotto // Scientific Reports. V.9(1). 2019. P.1-12. DOI:10.1038/s41598-019-45172-5
18. Goodrich H. R., Clark T. D. Why do some fish grow faster than others? // Fish and Fisheries. 2023. DOI:10.32942/X2S59W.

References

1. Lagutkina L. Yu. Perspektivnoe razvitie mirovogo proizvodstva kormov dlya akvakul'tury: al'ternativnye istochniki syr'ya [Promising development of global aquaculture feed production: alternative sources of raw materials]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe khozyaystvo*, 2017, no. 1, pp. 67–78.
2. Miniyarov F. T. Resursosberegayushchie biotekhnologii po ispol'zovaniyu nasekomykh [Resource-saving biotechnologies for the use of insects]. *Estestvenny'e nauki: aktual'nye voprosy i sotsial'nye vyzovy: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Astrakhan', Astrakhanskiy universitet Publ., 2020, pp. 82–84.
3. Romanenko E. A. Kachestvo pishchevykh yaits pri ispol'zovanii kormovogo belka iz lichinok mukh chernaya l'vinka (*Hermetia illucens*) [Quality of edible eggs by using feed protein from black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*)]. *Sciences of Europe*, 2021, vol. 85, no. 2, pp. 3–5.
4. Lock E. R., Arsiwalla T., Waagbø R. Insect larvae meal as an alternative source of nutrients in the diet of Atlantic salmon (*Salmo salar*) postsmolt. *Aquaculture nutrition*, 2016, vol. 22, no. 6, pp. 1202–1213.
5. Ushakova N. A., Ponomarev S. V., Fedorovykh Yu. V., Bastrakov A. I. Ispol'zovanie protein-khitinovogo kontsentrata lichinok chernoy l'vinki (*Hermetia illucens*) v ratsione vseядnykh ryb na primere krasnoy tilyapii [The use of protein-chitin concentrate of the larvae of the black lion (*Hermetia illucens*) in the diet of omnivorous fish on the example of red tilapia]. *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2018, vol. 3, pp. 57–62.
6. Spranghers T., Ottoboni M., Klootwijk C., Obyn A., Deboosere S., Meulenaer B., Michiels J., Eeckhout M., Clercq P. De, Smet S. De. Nutritional composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupae reared on different organic waste sub-

strates. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, vol. 97, pp. 2594–2600. DOI: 10.1002/jsfa.8081.

7. Newton G. L., Booram C. V., Baker R. W., Hale O. M. Dried *Hermetia illucens* larvae meal as a supplement for swine. *Journal of Animal Science*, 1977, vol. 44, no. 3, pp. 395–400.

8. Belghit I., Liland N., Gjesdal P., Biancarosa I., Menchetti E., Li Yanxian, Waagbø R., Krogdahl A., Lock Erik-Jan. Black soldier fly larvae meal can replace fish meal in diets of sea-water phase Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture*, 2018, vol. 50, pp. 609–619. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2018.12.032.

9. Franco A., Scieuzo C., Salvia R., Mancini I.M., Caniani D., Masi S., Falabella P. Evaluating the growth and development of black soldier fly (BSF) (*Hermetia illucens* (L.), Diptera Stratiomyidae) larvae reared on different agricultural waste materials. *Serranga*, 2023, vol. 289, no. 1, pp. 55–68.

10. Mohd Rasdi F.L., Ishak A.R., Hua P.W., Mohd Shaifuddin S.N., Che Dom N., Shafie F.A., Abdullah A.M., Abdul Kari Z., Edinur H.A. Growth and development of black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.), Diptera Stratiomyidae) larvae grown on carbohydrate, protein, and fruit-based waste substrates. *Malaysian Applied Biology*, 2022, vol. 51, no. 6, pp. 57–64. DOI: 10.55230/mabjournal.v51i6.2386.

11. Barulin N. V. *Akvakul'tura tsennykh vidov ryb i resursosberegayushchie tekhnologii* [Aquaculture of valuable fish species and resource-saving technologies]. Gorki, BGSKHA Publ., 2018, part 1, 237 p.

12. Shitikov V. K., Rozenberg G. S. *Randomizatsiya i butstrep: statisticheskiy analiz v biologii i ekologii s ispol'zovaniem R* [Randomization and bootstrap: statistical analysis in biology and ecology using R]. Tol'yatti, Kassandra Publ., 2013, 314 p.

13. Gross J., Ligges U. Package 'nortest': Tests for Normality. Ver. 1.0-4 (2022–10–13). Available at: <https://cran.r-project.org/web/packages/nortest/nortest.pdf> (Accessed 10 April 2023).

14. R Core Team, 2020. R a language and environment for statistical computing. R version 4.0.1. (2020–06–06). Vienna: R Foundation for Statistical Computing. Available at: <http://www.r-project.org> (Accessed 14 May 2021).

15. Ushakova N. A., Ponomarev S. V., Fedorovykh Yu. V., Bastrakov A. I., Pavlov D. S. Fiziologicheskie osnovy pitatel'noy tsennosti kontsentrata lichinok *Hermetia illucens* v ratsione ryb [Physiological basis of nutritional value of *Hermetia illucens* larval concentrate in fish diet]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya biolo-gicheskaya*, 2020, no. 3, pp. 293–300.

16. Henry M., Gasco L., Piccolo G., Fountoulaki E. Review on the use of insects in the diet of farmed fish: Past and future. *Animal Feed Science and Technology*, 2015, vol. 203, pp. 1–22.

17. Zarantonello M., Randazzo B., Truzzi C., Giorgini E., Marcellucci C., Vargas-Abúndez J., Zimbelli A., Annibaldi A., Parisi G., Tulli F., Riolo P., Olivotto I. A six-months study on Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) based diets in zebrafish. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, no. 1, pp. 1–12. DOI: 10.1038/s41598-019-45172-5/.

18. Goodrich H. R., Clark T. D. Why do some fish grow faster than others? *Fish and Fisheries*, 2023. DOI: 10.32942/X2S59W.

Информация об авторах

С. В. Матросова – директор научно-исследовательского центра по аквакультуре, преподаватель кафедры общей химии

С. Н. Лябзина – доктор биологических наук, профессор

В. В. Горбач – доктор биологических наук, доцент, заведующий кафедрой зоологии и экологии

Ю. Н. Ильмаст – студент

Information about the authors

S. V. Matrosova – Head of Aquaculture Research Center, Lecturer, Department of General Chemistry

S. N. Lyabzina – Doctor of Biology, Professor

V. V. Gorbach – Doctor of Biology, Head of the Department of Zoology and Ecology

Yu. N. Ilmast – student

Статья поступила в редакцию 11.09.2023; одобрена после рецензирования 21.09.2023; принята к публикации 29.09.2023.

The article was submitted 11.09.2023; approved after reviewing 21.09.2023; accepted for publication 29.09.2023.

Научная статья
УДК 579.68(470.26)(06)
DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-24-37

Структура микробного сообщества пруда Верхнего (г. Калининград)

Анастасия Ивановна Моисеева

Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

nastyam.1234@mail.ru

Аннотация. Формирование качества воды в водоеме и водотоках бассейна пруда Верхнего обусловлено сложными процессами и находится под воздействием многочисленных природных и антропогенных факторов. Скорость метаболизма и короткое время генерации микроорганизмов дают им возможность гораздо быстрее, чем другим компонентам биоты, реагировать на меняющиеся условия среды. В результате анализа структуры микробного сообщества пруда Верхнего выявлена гетерогенность микробных популяций. В составе бактериофлоры воды обнаружены грамотрицательные бактерии семейств Enterobacteriaceae, Pseudomonadaceae, Vibrionaceae. Грамположительная микрофлора включала микроорганизмы родов *Bacillus*, *Micrococcus*, *Staphylococcus*. Широкое распространение в микробных популяциях получили грамотрицательные палочковидные бактерии рода *Pseudomonas*, входящие в группу 4 «Грамотрицательные, аэробные/микроаэрофильные палочки и кокки», подгруппа 4А. Отмечались существенные преобразования сообществ микроорганизмов (увеличение доли грамотрицательных бактерий). Количество палочковидных бактерий рода *Aeromonas* достигло максимального значения в мае 2023 года (74,94 % от всех выделенных штаммов бактерий). Изменение структуры микробных сообществ в сторону увеличения доли грамотрицательных бактерий свидетельствует о выраженном антропогенном прессинге. Численность гетеротрофных бактерий, утилизирующих легкодоступное органическое вещество в воде, изменялась в пределах от $1,2 \times 10^3$ до $4,2 \times 10^4$ КОЕ/мл. Максимальные показатели отмечались вблизи приустьевой части ручья Ботанического, что указывало на высокое содержание в воде органических веществ. Увеличение численности гетеротрофного бактериопланктона может выступать косвенным показателем неполной деструкции, незавершенности трансформации поступающего в водоток органического вещества, в том числе антропогенного происхождения. В микрофлоре воды пруда Верхнего выявлено присутствие санитарно-значимых бактерий фекальной группы, которые относятся к индикаторам санитарного неблагополучия водной среды.

Ключевые слова: пруд Верхний, микробные сообщества, антропогенное воздействие.

Для цитирования: Моисеева А. И. Структура микробного сообщества пруда Верхнего (г. Калининград) // Известия КГТУ. 2023. № 71. С. 24-37. DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-24-37

Original article

Structure of the microbial community of the Verkhniy pond (Kaliningrad)

Anastasiya I. Moiseeva

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

nastya.m.1234@mail.ru

Abstract. The formation of water quality in the reservoir and watercourses of the Verkhniy pond basin is caused by complex processes and is influenced by numerous natural and anthropogenic factors. The speed of metabolism and the short time of generation of microorganisms allow them to react to changing environmental conditions much faster than other components of biota. As a result of the analysis of the structure of the microbial community of the Verkhniy pond, heterogeneity of microbial populations has been revealed. Gram-negative bacteria of the families Enterobacteriaceae, Pseudomonadaceae, Vibrionaceae have been found in the composition of the bacterioflora of water. Gram-positive microflora included microorganisms of the genera *Bacillus*, *Micrococcus*, *Staphylococcus*. Gram-negative rod-like bacteria of the genus *Pseudomonas*, belonging to group 4 «Gram-negative, aerobic/micro-aerophilic rods and coccus», subgroup 4A, were widely distributed in microbial populations. Significant changes in microorganism communities (increase in the proportion of gram-negative bacteria) have been noted. The number of rod-like bacteria of the genus *Aeromonas* peaked in May 2023 (74.94% of all isolated bacterial strains). The change in the structure of microbial communities towards an increase in the proportion of gram-negative bacteria indicates a pronounced anthropogenic pressure. The numbers of heterotrophic bacteria utilizing readily available organic matter in water ranged from $1,2 \times 10^3$ to $4,2 \times 10^4$ CFU/ml. The highest levels have been observed near the estuary of the Botanical Stream, indicating a high content of organic matter in the water. An increase in the number of heterotrophic bacterioplankton may be an indirect indicator of incomplete destruction, incomplete transformation of organic matter entering the watercourse, including anthropogenic origin. In the microflora of the water of the Verkhniy pond, the presence of sanitary-significant bacteria of the fecal group, which belong to the indicators of sanitary malaise of the aquatic environment has been detected.

Keywords: the Verkhniy pond, microbial communities, anthropogenic pollution.

For citation: Moiseeva A. I. Structure of the microbial community of the Verkhniy pond (Kaliningrad). *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2023; (71):24-37. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-24-37

ВВЕДЕНИЕ

Комплекс водных объектов г. Калининграда – это гидрографическая система, состоящая из ручьев, рек, озер и прудов различного происхождения [1].

Пруд Верхний является искусственным водоемом, бассейн которого формирует особенности городской и парковой архитектуры, выполняет дренажно-осушительную и рекреационную функции. Площадь бассейна (23,4 км²) занимает около 1/10 площади всего города (223 км²) [1–3].

Гидрологический узел пруда Верхнего включает шесть водных объектов, из которых одни питают пруд (водотоки – р. Голубая, руч. Ботанический (К-1), руч. Северный (ОБ-2-2)), другие – разгружают его (руч. Парковый, руч. Литовский и пруд Нижний), вода из которых поступает в р. Преголю.

Мониторинг, выполняемый до 2020 г. сотрудниками кафедры ихтиопатологии и гидробиологии Калининградского государственного технического университета (КГТУ), а затем работниками кафедры водных биоресурсов и аквакультуры, показал, что более 20 лет экологическая ситуация пруда Верхнего остается довольно напряженной [1]. Загрязнение пруда происходит за счет сброса промышленных и бытовых сточных вод, замусоривания берегов и поступления со сточными водами патогенных микроорганизмов, что приводит к ухудшению его экологического состояния [2, 4, 5, 6, 7]. Процессы самоочищения воды замедляются, нарастает уровень антропогенной эвтрофикации, в результате возникает и сохраняется серьезная экологическая проблема [6]. Бактериальному звену принадлежит ведущая роль в самоочищении воды, что определяется разнообразием способов функционирования бактерий и существованием разных групп, способных к утилизации веществ различного происхождения [8]. Под влиянием различных факторов окружающей среды происходят значительные изменения структуры микробиоценозов водных экосистем, увеличивается количество условно-патогенных грамотрицательных факультативно-анаэробных и аэробных микроорганизмов, что определяет изучение указанных аспектов как одну из существенных задач микробиологического мониторинга [9]. Целью настоящей работы было изучение структуры микробного сообщества пруда Верхнего.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Материалом для исследований послужили пробы воды, отобранные из пруда Верхнего. Сбор материала проводили в период с марта по май 2023 г. В пределах пруда было определено пять станций отбора проб, расположенных по акватории с учетом гидрологических условий (рис. 1).

За период исследования было отобрано 33 пробы воды, выделено и изучено 2768 штаммов бактерий.

Пробы воды для микробиологического анализа отбирали из поверхностного горизонта и в толще воды при помощи батометра. Для выделения групп микроорганизмов, участвующих в превращениях веществ в водоеме и круговороте биогенных элементов, применяли среды общего назначения, элективные и дифференциально-диагностические [10–11].

Для изучения состава сапрофитных бактерий был использован рыбопептонный агар [10]. Агар Эндо применяли для учета в микрофлоре воды бактерий группы кишечных палочек и других грамотрицательных микроорганизмов.



Рис. 1. Схема расположения станций отбора проб. Пруд Верхний
Fig. 1. Water quality sampling stations. The Verkhniy pond

Для выявления в микрофлоре воды грамотрицательных бактерий родов *Aeromonas* и *Pseudomonas* использовали дифференциально-диагностический агар [11].

Для количественной оценки изучаемых групп бактерий применяли метод серийных разведений. Методика посева включала перемешивание анализируемой пробы воды, внесение из соответствующих разведений (с 10^{-1} по 10^{-3}) по 1 мл суспензии в стерильные чашки Петри и прибавление в каждую чашку по 8–12 мл расплавленного и остуженного до 45–49 °С питательного агара [4].

Численность гетеротрофных бактерий, утилизирующих легкодоступное органическое вещество в воде, определяли по показателю общей бактериальной обсемененности или общему микробному числу воды.

Родовую идентификацию микроорганизмов осуществляли по совокупности культуральных, морфологических и физиолого-биохимических признаков с помощью «Определителя бактерий Берджи» [12–13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты проведенных исследований показали, что структура микробиоценоза пруда Верхнего на исследованных станциях (ст. 1 – ст. 5) существенно различалась. Микробные ассоциации в марте представлены преимущественно грамотрицательными видами (рис. 2).

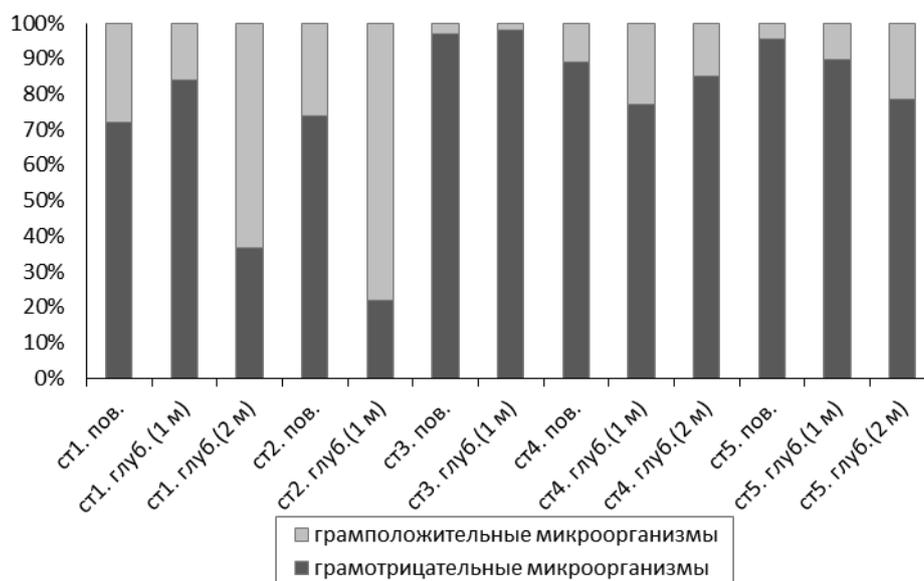


Рис. 2. Соотношение групп бактерий в микрофлоре воды пруда Верхнего на различных участках. Март 2023 г.

Fig. 2. The ratio of bacterial groups in the water microflora of the Verkhniy pond at different sites. March 2023

На второй станции (ст. 2, глуб. 1 м) отмечена низкая доля грамотрицательных микроорганизмов (20 %). В составе микробного сообщества на третьей станции преобладали грамотрицательные условно-патогенные бактерии (более 90 % от всех выделенных штаммов).

С глубиной соотношение грамположительных и грамотрицательных бактерий менялось в сторону увеличения доли грамположительных бактерий (ст. 1, ст. 2, ст. 3, ст. 5).

В апреле состав микрофлоры воды представлен равным соотношением грамположительных и грамотрицательных видов (рис. 3).

На первой станции (ст. 1, пов.) незначительную долю занимали грамотрицательные условно-патогенные бактерии (менее 20 % от всех выделенных штаммов).

Доминирующей группой на четвертой станции (ст. 4, глуб. 2 м) были грамотрицательные палочковидные бактерии (90 %).

Состав микробного сообщества пруда Верхнего в мае менялся в сторону увеличения доли грамотрицательных микроорганизмов (рис. 4).

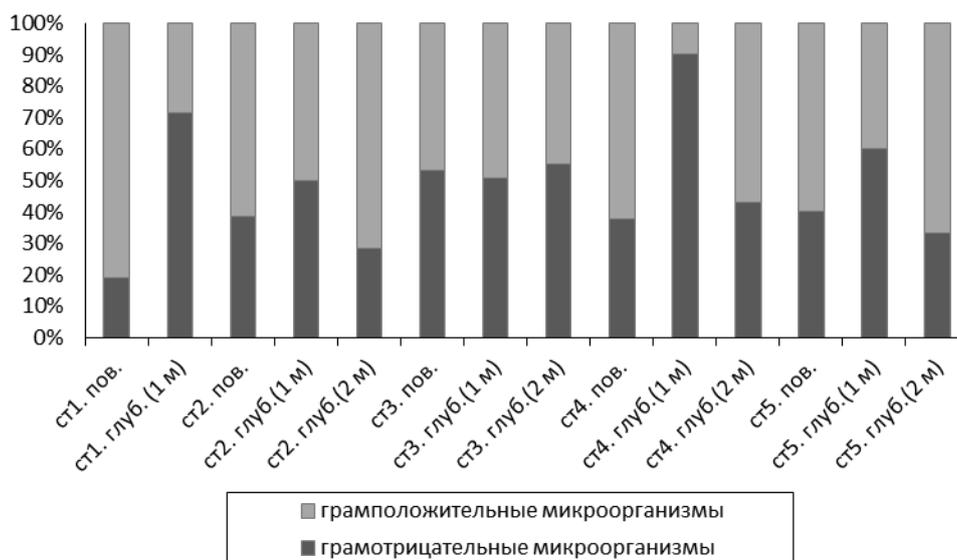


Рис. 3. Соотношение групп бактерий в микрофлоре воды пруда Верхнего на различных участках. Апрель 2023 г.
 Fig. 3. The ratio of bacterial groups in the water microflora of the Verkhniy pond at different sites. April 2023

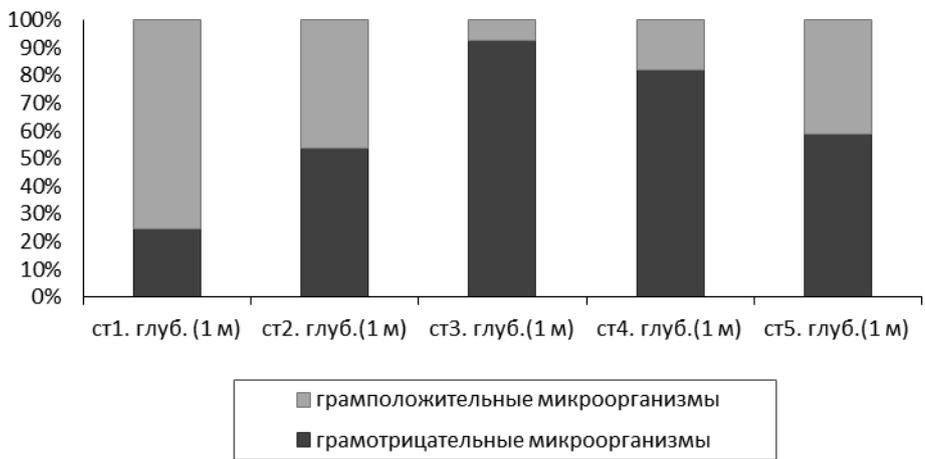


Рис. 4. Соотношение групп бактерий в микрофлоре воды пруда Верхнего на различных участках. Май 2023 г.
 Fig. 4. The ratio of bacterial groups in the water microflora of the Verkhniy pond at different sites. May 2023

В марте и мае на 3 и 4 станциях, расположенных в северной части пруда, преобладали грамотрицательные условно-патогенные палочковидные микроорганизмы.

Большая доля грамотрицательных бактерий на станциях 3 и 4 согласно [14] говорит об антропогенном загрязнении.

Качественный состав микробного сообщества пруда Верхнего представлен грамотрицательными палочковидными бактериями семейств Enterobacteriaceae, Pseudomonadaceae, Vibrionaceae. Грамположительная микрофлора включала микроорганизмы родов *Bacillus*, *Micrococcus*, *Staphylococcus*.

Частота встречаемости выделенных штаммов микроорганизмов в воде пруда Верхнего приведена в табл. 1.

Таблица 1. Качественный состав микробного сообщества в воде пруда Верхнего в 2023 г.

Table 1. Qualitative composition of the microbial community in the studied water. The Verkhniy pond. 2023

Выделенные штаммы	Частота встречаемости, %		
	Пруд Верхний. Март 2023 г.	Пруд Верхний. Апрель 2023 г.	Пруд Верхний. Май 2023 г.
Сем. Enterobacteriaceae	0,71	3,26	0,37
p. <i>Pseudomonas</i>	85,35	46,59	12,09
p. <i>Aeromonas</i>	0,10	–	74,94
p. <i>Bacillus</i>	3,36	49,75	12,59
p. <i>Staphylococcus</i>	–	0,41	–
p. <i>Micrococcus</i>	10,48	–	–

Из грамотрицательных бактерий широкое распространение в исследуемой воде на протяжении трех месяцев получили бактерии рода *Pseudomonas*, входящие в группу 4 («Грамотрицательные, аэробные/микроаэрофильные палочки и кокки», подгруппа 4А). Среди грамположительных обнаружены бактерии родов *Bacillus* (группа 18 «Грамположительные палочки и кокки, образующие эндоспоры») и *Micrococcus*, входящие в группу 17 («Грамположительные кокки»). В единичных количествах в микрофлоре воды встречались кокковые бактерии рода *Staphylococcus*. Доля аэромонад достигла максимального значения за период исследования в мае 2023 г. (74,94 % от всех выделенных штаммов бактерий).

Следует отметить выявленные особенности микробного сообщества пруда Верхнего на отдельных участках в марте (рис. 5).

Доминирующей группой в марте на исследуемых участках были грамотрицательные бактерии рода *Pseudomonas*. В микрофлоре воды обнаружены сапрофитные бактерии рода *Bacillus* и кокковые бактерии рода *Micrococcus*. В единичных количествах встречались грамотрицательные палочковидные бактерии семейства Enterobacteriaceae (группа 5 «Факультативно анаэробные грамотрицательные палочки», подгруппа 1).

Широкое распространение в микробных популяциях получили палочковидные грамотрицательные бактерии (рис. 6).

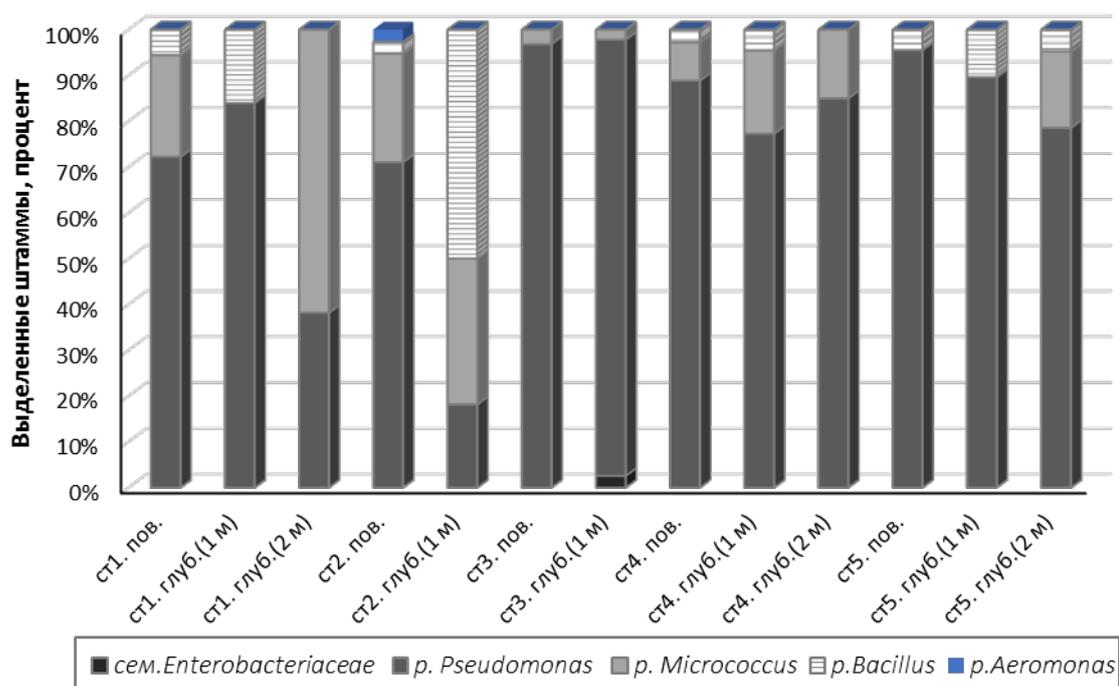


Рис. 5. Состав микробного сообщества воды. Пруд Верхний. Март 2023 г.
 Fig. 5. Composition of the microbial community of water. The Verkhniy pond. March 2023

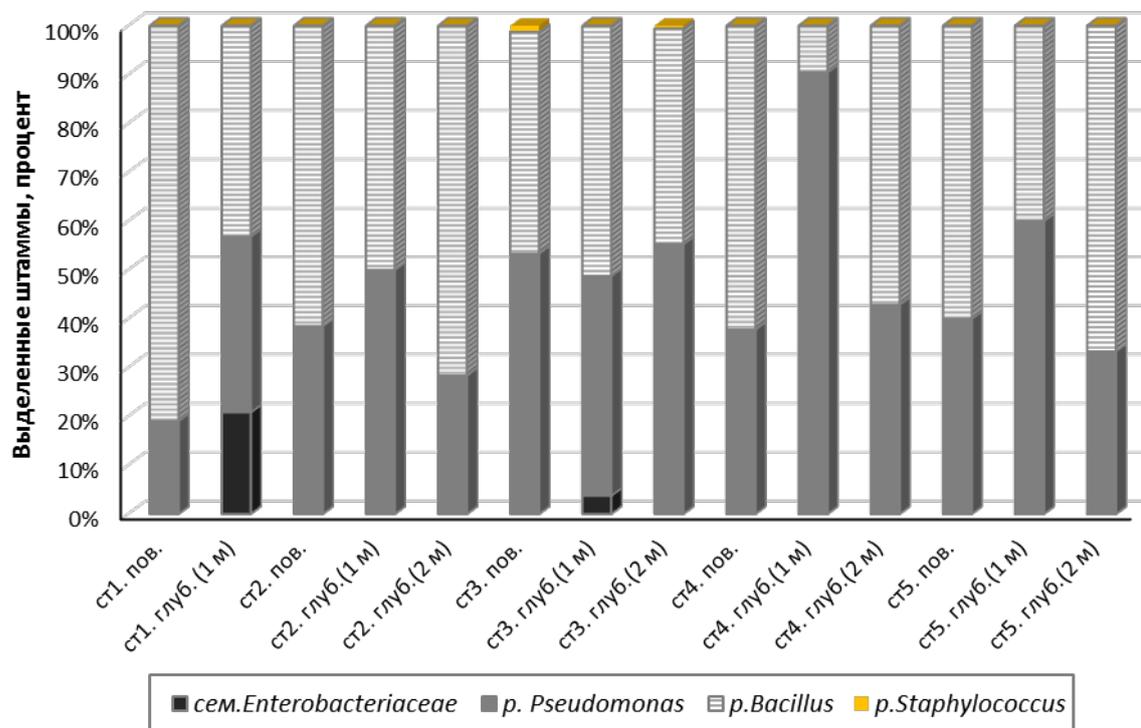


Рис. 6. Состав микробного сообщества воды. Пруд Верхний. Апрель 2023 г.
 Fig. 6. Composition of the microbial community of water. The Verkhniy pond. April 2023

Второй доминирующей группой на всех исследуемых станциях в апреле были сапрофитные споровые бациллы. Доля грамположительных бактерий возросла. В микрофлоре воды выделили четыре таксономические группы бактерий: грамотрицательные палочковидные бактерии семейств Enterobacteriaceae, Pseudomonadaceae, Vibrionaceae, грамположительные микроорганизмы рода *Bacillus* (рис. 7).

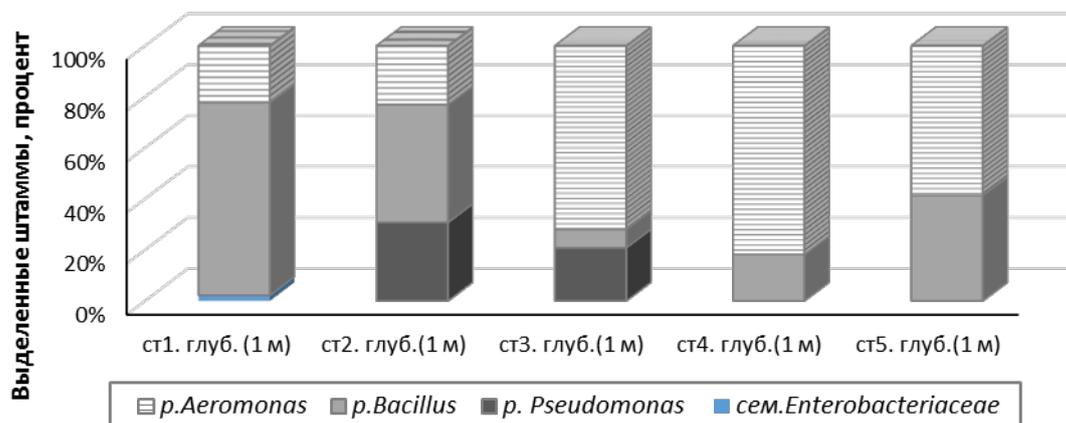


Рис. 7. Состав микробного сообщества воды. Пруд Верхний. Май 2023 г.
 Fig. 7. Composition of the microbial community of water. The Verkhniy pond. May 2023

В мае на третьей и четвертой станциях возросла доля бактерий аэромонад-но-псевдомонадного комплекса.

Изменение общей бактериальной обсемененности воды на исследуемых участках представлено на рис. 8.

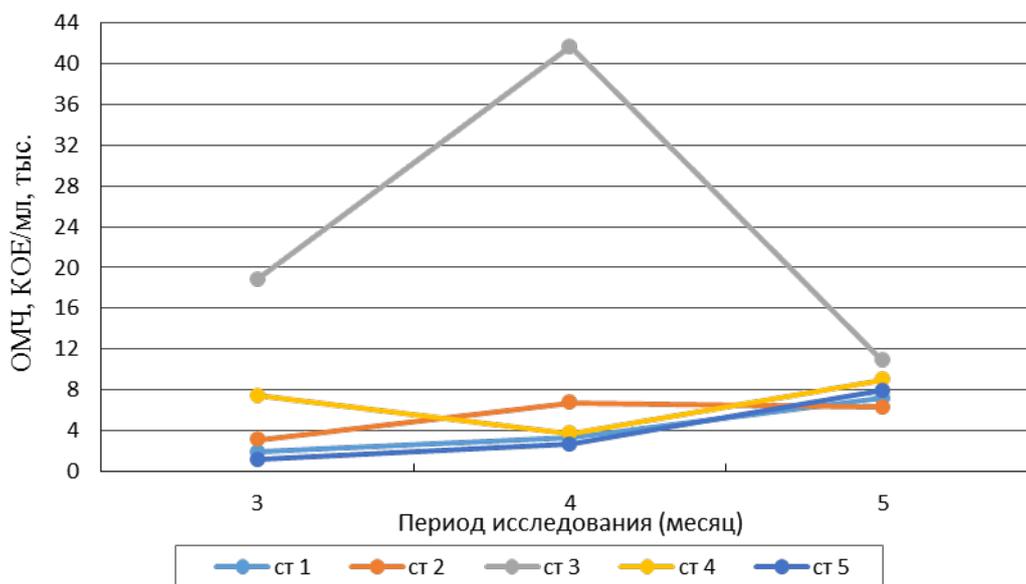


Рис. 8. Изменение общей бактериальной обсемененности воды на исследуемых участках. Пруд Верхний
 Fig. 8. Change in the total bacterial contamination of water at the studied sites. The Verkhniy pond

Анализ численности гетеротрофных бактерий в воде пруда Верхнего выявил широкий диапазон их колебаний от $1,2 \times 10^3$ КОЕ/мл (на 3-й месяц исследований) до $4,2 \times 10^4$ КОЕ/мл (на 4-й месяц исследований). Общая бактериальная обсемененность воды пруда Верхнего возросла на 1-й, 4-й и 5-й станциях, расположенных в южной и северной частях исследуемого водоема (на 5-й месяц исследований). Температурные условия и наличие органического вещества в воде влияли на активизацию и рост сапрофитных бактерий. Количество гетеротрофных бактерий максимально за весь период исследования на третьей станции, расположенной в районе ручья Ботанического.

Увеличение численности гетеротрофных микроорганизмов может выступать косвенным показателем неполной деструкции, незавершенности трансформации поступающего в водоток органического вещества, в том числе антропогенного происхождения.

Оценкой экологического состояния внутренних водоемов Калининградской области, используемых в рекреационных целях, занимались преподаватели и сотрудники кафедры водных биоресурсов и аквакультуры. В 2018 и 2022 годах проведены исследования прудов Шенфлиз и Голубого, качество воды данных водоемов оценивали по гидрохимическим показателям [15–16]. С 2015 по 2016 годы были выполнены работы по ежемесячному экологическому мониторингу состояния воды в пруду Пелавском [17]. В 2019 году изучено экологическое состояние оз. Карповского по совокупности гидрохимических, гидрологических, микробиологических и гидробиологических параметров [18]. Пруд Верхний исследовали только по гидрохимическим показателям [2, 3, 5].

Изучение микрофлоры воды, анализ численности гетеротрофных микроорганизмов, участвующих в деструкции поступающего в водоток органического вещества, и наличие бактерий, относящихся к индикаторам санитарного неблагополучия водной среды, имеют важное значение для оценки экологического состояния водоемов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, микробное сообщество пруда Верхнего представлено грамотрицательными палочковидными бактериями семейств *Enterobacteriaceae*, *Pseudomonadaceae*, *Vibrionaceae*. Грамположительная микрофлора включала микроорганизмы родов *Bacillus*, *Micrococcus*, *Staphylococcus*. Доминирующей группой в исследуемой воде были грамотрицательные палочковидные бактерии родов *Pseudomonas* и *Aeromonas*.

Микрофлора воды пруда Верхнего вблизи приустьевой части ручья Ботанического характеризовалась преобладанием грамотрицательных палочковидных бактерий над грамположительными микроорганизмами. Изменение структуры микробных сообществ в сторону увеличения доли грамотрицательных бактерий свидетельствует о выраженном антропогенном прессинге.

Санитарно-микробиологический анализ воды пруда Верхнего выявил присутствие в составе ее микрофлоры санитарно-значимых бактерий фекальной группы, которые относятся к индикаторам санитарного неблагополучия водной среды и в ассоциации с условно-патогенными бактериями могут вызвать бактериальные инфекции у рыб [18, 19].

Список источников

1. Берникова Т. А., Цупикова Н. А., Нагорнова Н. Н. Роль водных объектов в обеспечении устойчивого развития городской среды (на примере бассейна пруда Верхнего в г. Калининграде) // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2013. № 4. С. 97–107.
2. Цупикова Н. А., Блоцкая Е. Н., Рябцева Е. А. Некоторые результаты экологического мониторинга пруда Верхнего (г. Калининград) в 2015 году // Научно-исследовательские публикации. 2016. № 2. С. 107–116.
3. Рябцева Е. А., Цупикова Н. А. Пространственное распределение гидрохимических показателей в Верхнем пруду города Калининграда // Известия КГТУ. 2019. № 54. С. 61–74.
4. Общая и санитарная микробиология с техникой микробиологических исследований: учебное пособие / А. С. Лабинская [и др.]. Санкт-Петербург: Лань, 2022. 588 с.
5. Цупикова Н. А., Бугранова О. С. Влияние самоочищения на качество воды в системе прудов Верхний – Нижний (г. Калининград) летом 2015 г. // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промышленное и техническое использование: IX Всероссийская научно-практическая конференция (20–22 марта 2018 г.): материалы. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2018. С. 95–98.
6. Сахарова О. В., Сахарова Т. Г. Водная микробиология: учебник для вузов. Санкт-Петербург: Лань, 2022. 260 с.
7. Госманов Р. Г., Ибрагимова А. И., Галиуллин А. К. Микробиология и иммунология: учебное пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2023. 240 с.
8. Теканова Е. В., Макарова Е. М., Калининкина Н. М. Оценка состояния воды притоков Онежского озера в условиях антропогенного воздействия по микробиологическим и токсикологическим показателям // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 9. С. 44–52.
9. Самойлова И. Ю., Анганова Е. В., Савилов Е. Д. Таксономическая характеристика микробиоценоза реки Лены в районе г. Якутска, Хангаласского и Намского районов (Республика Саха (Якутия)) // Сибирский медицинский журнал. 2009, № 7. С. 192–194.
10. Казимирченко О. В., Котлярчук М. Ю. Практикум по микробиологии: учебное пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2020. 124 с.
11. Методы общей бактериологии / под ред. Ф. Герхардта. Москва: Мир, 1984. Т. 3. 264 с.
12. Определитель бактерий Берджи / под ред. Дж. Хоулта, Н. Крига, П. Снита, Дж. Стейли, С. Уильямса. Москва: Мир, 1997. Т. 1. 432 с.
13. Определитель бактерий Берджи / под ред. Дж. Хоулта, Н. Крига, П. Снита, Дж. Стейли, С. Уильямса. Москва: Мир, 1997. Т. 2. 368 с.
14. Богданова О. Ю. Микробиология водных экосистем: учебное пособие. Мурманск: Изд-во ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2016. 150 с.
15. Цупикова Н. А., Меньшенин А. С. Оценка состояния пруда Шенфлиз (г. Калининград) по гидрохимическим показателям в 2018 году // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промышленное и техническое использование: материалы X Национальной (всероссийской) научно-практической конфе-

ренции (19–21 марта 2019 г.). Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2019. С. 128–132.

16. Современное экологическое состояние водоемов рекреационного назначения Калининграда / Е. А. Севостьянова [и др.] // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промышленное и техническое использование: материалы XIII Национальной (Всероссийской) научно-практической конференции (29–30 марта 2022 г.). Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2022. С. 193–197.

17. Лоцицкая Е. А., Цупикова Н. А. Некоторые результаты экологического мониторинга пруда Пелавского в 2015–2016 гг. // Вестник молодежной науки. Калининград: ФГБОУ ВПО «КГТУ». 2017. № 1. С. 1–7.

18. Оценка экологического состояния озера Карповского в 2019 г. / Лоцицкая Е. А., Бугранова О. С., Казимирченко О. В., Цупикова Н. А. // Известия КГТУ. 2020. № 59. С. 73–87.

19. Morsy K., Mishra A., Galal M. Water Quality Assessment of the Nile Delta Lagoons // Air, Soil and Water Research. 2020. V. 13. P. 1–11.

References

1. Bernikova T. A., Tsupikova N. A., Nagornova N. N. Rol' vodnykh ob"ektov v obespechenii ustoychivogo razvitiya gorodskoy sredy (na primere basseyna pruda Verkhnego v g. Kaliningrade) [The role of water bodies in ensuring sustainable development of the urban environment (on the example of the Verkhniy pond basin in Kaliningrad)]. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, 2013, no. 4, pp. 97–107.

2. Tsupikova N. A., Blotskaya E. N., Ryabtseva E. A. Nekotorye rezul'taty ekologicheskogo monitoringa pruda Verkhnego (g. Kaliningrad) v 2015 godu [Some results of environmental monitoring of the Verkhniy pond (Kaliningrad) in 2015]. *Nauchno-issledovatel'skie publikatsii*, 2016, no. 2, pp. 107–116.

3. Ryabtseva E. A., Tsupikova N. A. Prostranstvennoe raspredelenie gidrokhimicheskikh pokazateley v Verkhnem prudu goroda Kaliningrada [Spatial distribution of hydrochemical parameters in the Verkhniy pond (Kaliningrad)]. *Izvestiya KGTU*, 2019, no. 54, pp. 61–74.

4. Labinskaya A. S. [i dr.]. *Obshchaya i sanitarnaya mikrobiologiya s tekhnikoy mikrobiologicheskikh issledovaniy: uchebnoe posobie* [General and sanitary microbiology with microbiological research techniques: textbook]. Saint-Petersburg, Lan', 2022, 588 p.

5. Tsupikova N. A., Bugranova O. S. Vliyanie samoochishcheniya na kachestvo vody v sisteme prudov Verkhniy – Nizhniy (g. Kaliningrad) letom 2015 g. [Influence of self-purification on water quality in the Verkhniy – Nizhniy pond system (Kaliningrad) in the summer of 2015]. *Prirodnye resursy, ikh sovremennoe sostoyanie, okhrana, promyslovoe i tekhnicheskoe ispol'zovanie: materialy X Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (20–22 marta 2018 g.)* [Natural resources, their current condition, protection, industrial and technical use: proceedings of the IX National Russian Scientific and Practical Conference (20–22 March 2018)]. Petropavlovsk-Kamchatskiy, KamchatGTU, 2018, pp. 95–98.

6. Sakharova O. V., Sakharova T. G. *Vodnaya mikrobiologiya: uchebnik dlya vuzov* [Water microbiology: textbook for universities]. Saint-Petersburg, Lan', 2022, 260 p.
7. Gosmanov R. G., Ibragimova A. I., Galiullin A. K. *Mikrobiologiya i immunologiya: uchebnoe posobie* [Microbiology and immunology: textbook]. Saint-Petersburg, Lan', 2023, 240 p.
8. Tekanova E. V., Makarova E. M., Kalinkina N. M. Otsenka sostoyaniya vody pritokov Onezhskogo ozera v usloviyakh antropogennogo vozdeystviya po mikrobiologicheskim i toksikologicheskim pokazatelyam [Assessment of the condition of the water of lake Onego inflowing streams under human impact using microbiological and toxicological parameters]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 2015, no. 9, pp. 44–52.
9. Samoylova I. Yu., Anganova E. V., Savilov E. D. Taksonomicheskaya kharakteristika mikrobiotsenoza reki Leny v rayone g. Yakutska, Khangalasskogo i Namskogo rayonov (Respublika Sakha (Yakutiya)) [Taxonomic features of microbiocenosis of the river Lena in the region of Yakutsk, Hangalassky and Namsky areas (Republic Sakha (Yakutia))]. *Sibirskiy meditsinskiy zhurnal*, 2009, no. 7, pp. 192–194.
10. Kazimirchenko O. V., Kotlyarchuk M. Yu. *Praktikum po mikrobiologii: uchebnoe posobie* [Microbiology Workshop: textbook]. Saint-Petersburg, Lan', 2020, 124 p.
11. Gerkhardt F. *Metody obshchey bakteriologii* [Methods of general bacteriology]. Moscow, Mir, 1984, vol. 3, 264 p.
12. Khoul't Dzh., Krig N., Snit P., Steyli Dzh., Uil'yams S. *Opredelitel' bakteriy Berdzhii* [Bergey's bacteria identifier]. Moscow, Mir, 1997, vol. 1, 432 p.
13. Khoul't Dzh., Krig N., Snit P., Steyli Dzh., Uil'yams S. *Opredelitel' bakteriy Berdzhii* [Bergey's bacteria identifier]. Moscow, Mir, 1997, vol. 2, 368 p.
14. Bogdanova O. Yu. *Mikrobiologiya vodnykh ekosistem: uchebnoe posobie* [Microbiology of aquatic ecosystems: textbook]. Murmansk, FGBOU VPO «MSTU» Publ., 2016, 150 p.
15. Tsupikova N. A., Men'shenin A. S. Otsenka sostoyaniya pruda Shenfliz (g. Kaliningrad) po gidrokhimicheskim pokazatelyam v 2018 godu [Assessment of the Shenfliz pond condition (Kaliningrad) due to hydrochemical indicators in 2018]. *Prirodnye resursy, ikh sovremennoe sostoyanie, okhrana, promyslovoe i tekhnicheskoe ispol'zovanie: materialy IX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (19–21 marta 2019 g.)* [Natural resources, their current condition, protection, industrial and technical use: proceedings of the IX National Russian Scientific and Practical Conference (19-21 March 2019)]. Petropavlovsk-Kamchatskiy, KamchatGTU, 2019, pp. 128–132.
16. Sevost'yanova E. A. [i dr.] *Sovremennoe ekologicheskoe sostoyanie vodoevov rekreatsionnogo naznacheniya Kaliningrada* [Current ecological condition of recreational water bodies in Kaliningrad]. *Prirodnye resursy, ikh sovremennoe sostoyanie, okhrana, promyslovoe i tekhnicheskoe ispol'zovanie: materialy XIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (29–30 marta 2022 g.)* [Natural resources, their current condition, protection, industrial and technical use: proceedings of the XIII National Russian Scientific and Practical Conference (29-30 March 2022)]. Petropavlovsk-Kamchatskiy, KamchatGTU, 2022, pp. 193–197.

17. Lozitskaya E. A., Tsupikova N. A. Nekotorye rezultaty ekologicheskogo monitoringa pruda Pelavskogo v 2015–2016 gg. [Some results of environmental monitoring of the Pelavsky pond in 2015–2016]. *Vestnik molodezhnoy nauki*, 2017, no. 1, pp. 1–7.

18. Lozitskaya E. A., Bugranova O. S., Kazimirchenko O. V., Tsupikova N. A. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya ozera Karpovskogo v 2019 g. [Assessment of the ecological state of Lake Karpovsky in 2019]. *Izvestiya KGTU*, 2020, no. 59, pp. 73–87.

19. Morsy K., Mishra A., Galal M. Water Quality Assessment of the Nile Delta Lagoons. *Air, Soil and Water Research*, 2020, vol. 13, pp. 1–11.

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 31.08.2023; одобрена после рецензирования 10.09.2023; принята к публикации 19.09.2023.

The article was submitted 31.08.2023; approved after reviewing 10.09.2023; accepted for publication 19.09.2023.

Научная статья
УДК 582.272(612.112.3)
DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-38-55

**Модуляция фагоцитарной активности нейтрофилов водными экстрактами
Arthrothamnus bifidus и *Laminaria repens* (Laminariales, Ochrophyta)**

Ольга Валентиновна Перервенко¹, Нина Григорьевна Клочкова²

¹Филиал № 2 ФГКУ «1477 Военно-морской клинический госпиталь» Министерства обороны РФ, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

²Камчатский филиал Тихоокеанского института географии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

¹perervenko2014@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5453-2067> / SPIN-код: 2914-3008; Autor ID: 551049

²ninakl@mail.ru. SPIN-код: 4701-2618; Author ID: 344281; Scopus ID: 6602583957.

Аннотация. Обсуждаются изменения неспецифической резистентности иммунитета у 25 человек до и после воздействия на их кровь *in vitro* низкоконцентрированных праймирующих растворов (НПР), полученных из водных экстрактов камчатских ламинариевых водорослей *Arthrothamnus bifidus* и *Laminaria repens*. Пробы их крови активировали НПР дважды: в начале эксперимента и после тридцатидневного ежедневного употребления *per os* водорослевого геля, полученного из *Hedophyllum bongardianum*. Иммуномодулирующий эффект оценивали по фагоцитарной активности нейтрофилов, фагоцитарному числу, абсолютному фагоцитарному показателю и сумме фагоцитоза. Показано, что вещества, содержащиеся в альгогеле в доступной форме, способны проникать из желудочно-кишечного тракта в кровеносное русло, где под их влиянием нормализуется лейкоцитарный профиль крови. Концентрация НПР 0,25 % неэффективна, но при 5 % и выше наблюдалась супрессия фагоцитоза. НПР 0,5; 1 и 2 %, особенно из двухлетних образцов *A. bifidus* и *L. repens*, оказали на нейтрофилы наибольшее праймирующее воздействие и дополнительно инактивировали бактерии во внеклеточной среде. НПР из *L. repens* индуцировали процессы внеклеточной дегрануляции, а из *A. bifidus* – вели к формированию нейтрофильных внеклеточных ловушек. Результаты исследования показали, что изученные виды могут служить сырьем для получения БАДов с иммуномодулирующим действием.

Ключевые слова: *Arthrothamnus bifidus*, *Laminaria repens*, экстракты, праймирование, фагоцитарная активность, дегрануляция нейтрофилов, нейтрофильные внеклеточные ловушки.

Для цитирования: Перервенко О. В., Клочкова Н. Г. Модуляция фагоцитарной активности нейтрофилов водными экстрактами *Arthrothamnus bifidus* и *Laminaria repens* (Laminariales, Ochrophyta) // Известия КГТУ. 2023. № 71. С. 38-55. DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-38-55

Original article

Modulation of phagocytic activity of neutrophils with aqueous extracts of *Arthrothamnus bifidus* and *Laminaria repens* (Laminariales, Ochrophyta)

Olga V. Perervenko¹, Nina G. Klochkova²

¹Branch No. 2 of FGKU " 1477 Naval Clinical Hospital" of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

² Kamchatka Branch of the Pacific Institute of Geography (KF TIG) FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

¹perervenko2014@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5453-2067> / SPIN-код: 2914-3008; Autor ID: 551049

²ninakl@mail.ru. SPIN-код: 4701-2618; Author ID: 344281; Scopus ID: 6602583957.

Changes in nonspecific immune resistance of 25 persons before and after exposure on their blood *in vitro* by low-concentration priming solutions (LPS) obtained from aqueous extracts of Kamchatka's laminariacean algae *Arthrothamnus bifidus* and *Laminaria repens* are discussed. Their blood samples have been activated by HPR twice: at the beginning of the experiment and after thirty days of daily oral using of algalgel obtained from *Hedophyllum bongardianum*. The immunomodulatory effect was assessed by the phagocytic activity of neutrophils, phagocytic number, absolute phagocytic index and the amount of phagocytosis. It has been shown that the substances contained in algalgel in an accessible form are able to soak from the gastrointestinal tract into the bloodstream and have a normalizing effect on the leukocyte profile of the blood. The LPS concentration of 0.25% was ineffective; at the concentration of 5% and higher, suppression of phagocytosis was observed. LPS 0.5, 1 and 2%, especially from two-year-old samples of *A. bifidus* and *L. repens*, had the greatest priming effect on neutrophils and was complemented by inactivation of bacteria in the extracellular environment. LPS from *L. repens* induced extracellular degranulation processes, and those from *A. bifidus* led to the formation of neutrophil extracellular traps. The results of our study showed that the investigated species can be raw materials for the production of dietary supplements with an immunomodulating effect.

Keywords: *Arthrothamnus bifidus*, *Laminaria repens*, extracts, priming, phagocytica activity, neutrophil degranulation, neutrophil extracellular traps.

For citation: Perervenko O. V., Klochkova N. G. Modulation of phagocytic activity of neutrophils with aqueous extracts of *Arthrothamnus bifidus* and *Laminaria repens* (Laminariales, Ochrophyta). *Izvestia KGTU = KSTU News*. 2023; (71):38-55. (In Russ). DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-38-55

ВВЕДЕНИЕ

Многие болезнетворные агенты, вызывающие инфекционные заболевания, способны к модификации, поэтому часто демонстрируют высокую устойчивость к антибиотикам. В таких случаях для повышения врожденного и адаптивного иммунитета человека клинически оправдано использование природных иммуностимуляторов – веществ, активизирующих (праймирующих) деятельность обеспечивающих его клеток. В крови человека эту функцию, как известно, выполняют специальные фагоцитарные клетки – нейтрофилы. Среди многих известных иммуностимуляторов не последнее место принадлежит соединениям, содержащимся в морских бурых водорослях [1–3].

О лечебно-профилактических свойствах бурых ламинариевых водорослей известно с давних времен. В медицинской практике и лабораторных экспериментах с животными и культурами клеток используют выделенные в чистом виде альгиновые кислоты и их соли, фукоидан, ламинаран, фенольные и другие соединения [4–9]. Терапевтический эффект изучается и при употреблении бурых водорослей в качестве продуктов питания, БАДов, водорослевых гелей, для получения которых применяют низкотемпературный химический гидролиз или определенное физическое или физико-химическое воздействие, приводящее к разрушению клеточных оболочек, содержащих альгиновый матрикс. Особая ценность водорослевых гелей определяется сохранением в них в нативной биодоступной форме биоактивных органических и минеральных компонентов.

Среди дальневосточных бурых водорослей для медико-биологических исследований до сих пор привлекались виды, произрастающие в теплоумеренной зоне. Камчатские виды в данном ключе не рассматривались, поэтому данная работа призвана восполнить недостающие сведения. Необходимо определить возможности практического использования камчатских ламинариевых в качестве адаптогенов и иммуномодуляторов. Результаты, полученные по другим видам водорослей, частично опубликованы [10]. В настоящей статье обсуждается эффект праймирования фагоцитов крови в экспериментах *in vitro* водными экстрактами из разновозрастных представителей камчатских ламинариевых водорослей артрогамнус раздвоенный (*Arthrothamnus bifidus* (Gmelin) Ruprecht) и ламинария ползучая (*Laminaria repens*) до и после приема участниками эксперимента водорослевого геля. Отметим, что до самого последнего времени *L. repens* в тихоокеанской альгофлоре была известна как *L. longipes* [11, с. 156].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения иммуномодулирующей способности водорослевых препаратов были использованы водные экстракты из одно- и двухлетних представителей *A. bifidus* и *L. repens*, а также водорослевый гель, полученный из *Hedophyllum bongardianum* (Postels et Ruprecht) Yendo по технологии, описанной в работе Т. А. Ключковой и Н. С. Салтановой (2020) [12]. Указанные виды были собраны 20.08.2019 г. в поясе ламинариевых водорослей у открытого прибойного побережья на глубине 4 м в Авачинском заливе (Юго-Восточная Камчатка).

Для получения водорослевых экстрактов использовали пластинчатую часть слоевищ. Измельченные пластины смешивали с дистиллированной водой в соот-

ношении 1:1,5. Возраст образцов определяли с помощью регистрирующих структур: количества дихотомических разветвлений черешков у *A. bifidus* (рис. 1.1) и количества перетяжек пластин у *L. repens* (рис. 1.2). Экстрагирование вели в термостате в течение 36 часов при температуре 40 °С. Небольшие порции профильтрованных исходных экстрактов разбавляли физраствором до концентраций 0,25; 0,5; 1; 2; 5; 10; 15 % и таким образом готовили из них низкоконцентрированные праймирующие растворы (НПР) = (LPS англ.), которые далее использовали для активации фагоцитарной функции нейтрофилов. В общей сложности было приготовлено 28 НПР: по 7 из одно- и двулетних слоевищ *A. bifidus* и по 7 из одно- и двулетних слоевищ *L. repens*. Их хранили в холодильнике при температуре 4 °С в бутылках из темного стекла.



Рис. 1. Виды, использованные для получения экстрактов: 1 – *Arthrothamnus bifidus*, 2 – *Laminaria longipes*

Fig. 1. Species for obtaining extracts: 1 – *Arthrothamnus bifidus*, 2 – *Laminaria repens*

В описываемом эксперименте приняли участие 25 сотрудников Филиала № 2 военно-морского клинического госпиталя МО РФ: 8 мужчин и 17 женщин разного возраста. Он должен был показать влияние на нейтрофилы НПР из разновозрастных образцов разных видов водорослей и влияние концентрации НПР на эффективность праймирования. Кроме этого, предполагалось определить влияние на активацию нейтрофилов водорослевой пищевой добавки – геля из *H. bongardianum*. Кровь у участников эксперимента для определения процентного содержания в ней форменных элементов бралась дважды: в самом начале и после 30 дней ежедневного приема ими геля по 5 г три раза в день во время еды. Количество лейкоцитов в периферической крови и лейкоцитарную формулу определяли с помощью стандартных методов.

Венозную кровь участников эксперимента до и после приема геля аликвотировали по 250 мкл в 30 пробирок типа эппендорф. Две из них использовали в качестве контрольных проб, в остальные с помощью специального дозатора добавляли по 2,5 мкл разных НПР, а в контрольные пробы в том же объеме – физраствор. Сразу после этого пробы крови помещали на шейкирующее устройство и ставили его в термостат при температуре 37 °С на 30 мин. Затем в каждый эппендорф добавляли по 125 мкл раствора суточной культуры бактерии штамма ВКПМ

B-8172 *Staphylococcus aureus* ATCC 25923. Титрование раствора проводили с применением бактериального стандарта мутности $1 \cdot 10^8$ КОЕ/мл по McFarland, изготовленного государственным НИИ стандартизации и контроля биологических препаратов им. Л. А. Тарасевича. Шейкирующее устройство с пробирками вновь помещали на 30 мин в термостат с той же температурой (37 °С). Используя общепринятую методику, из каждой пробы готовили 2 мазка, окрашивали их по Романовскому-Гимзе и изучали под микроскопом «Leica DM500» с использованием объектива «Plan100x/1.25 Oil». Изучение препарата завершали после нахождения в 100 нейтрофилах количества поглощенных бактерий. В общей сложности в ходе исследования было изучено около 10 тыс. гематологических препаратов.

Функцию фагоцитоза оценивали по фагоцитарной активности нейтрофилов (ФАН), фагоцитарному числу (ФЧ), абсолютному фагоцитарному показателю (АФП) [13, 14], а также по сумме фагоцитоза (СФ) как сложение всех активных нейтрофилов с применением повышающих коэффициентов к группам наиболее активных клеток. Напомним, что ФАН показывает процент в изученной пробе клеток, заглотивших бактерии, второй – ФЧ – среднее количество поглощенных ими бактерий, показатель АФП представляет собой произведение четырех величин (общего количества лейкоцитов, количества нейтрофилов, ФАН и ФЧ), деленное на 10 000. Два первых значения брали из клинических анализов крови участников эксперимента.

Статистическую обработку данных вели с использованием программы компьютерного анализа «Statistica. ver. 10.0».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

A. bifidus и *L. repens* широко распространены в Северо-Западной Пацифике. В некоторых холодоумеренных районах они образуют значительные запасы и могут служить объектами водорослевого промысла. Это послужило причиной их выбора для настоящего исследования. *A. bifidus* встречается у Восточной Камчатки от зал. Озерной до мыса Лопатка, у Западной – от мыса Лопатка до зал. Камбальный. Вдоль Курильской гряды он распространен от о. Шумшу до о. Шикотан и Малых Курил. Индивидуальная масса его пластин может достигать 0,9 кг, а максимальная плотность поселения – 20 экз./м². У Северных Курил она увеличивается до 68 экз./м², у Южных Курил составляет 48 экз./м². Удельная биомасса вида у островов Парамушир, Шумшу, Атласова изменяется от 11,5 до 50 кг/м² [15], у Южных и Малых Курил не превышает 48 кг/м² [16].

Местом массового развития *L. repens* являются Восточная Камчатка, Командоры и Средние Курилы. Южная граница ее распространения – о. Кетой, северная – зал. Корфа. В Беринговом море на глубинах 12–17 м удельная биомасса *L. repens* составляла 5,6 кг/м² [17]. У Юго-Восточной Камчатки на глубине 0,5–2,5 м вид формирует заросли с плотностью 30–40 экз./м² и удельной биомассой до 36 кг/м². У южной оконечности Западной Камчатки *L. repens* встречается от нижнего горизонта литорали до 4 м, у нуля глубины образует 80–100 %-е проективное покрытие и удельную биомассу 3–5 кг/м² [18]. На Командорских островах максимальная удельная биомасса вида достигала 36 кг/м² и в среднем составляла 5,8 кг/м² [19]. Наибольшая плотность зарослей *L. repens* – 440 экз./м² – зарегистрирована у о. Парамушир, у о. Шумшу она – 267 экз./м² и о. Атласова – 56 экз./м² [15].

Общие запасы обоих видов в российских дальневосточных морях оцениваются в 350–500 тыс. т, для *A. bifidus* 100–150 тыс. тонн и для *L. repens* 250–350 тыс. т. [20].

Из 25 участников эксперимента до его конца по разным причинам дошли только 16 человек. В связи с этим среднестатистические данные по содержанию в пробах крови лейкоцитов были получены для соответствующего количества лиц: 25 на начальном этапе и 16 – на конечном. Изменения показателей лейкоцитарной формулы участников эксперимента до и после приема альгогеля показаны в табл. 1.

Таблица 1. Относительное (%) содержание лейкоцитов в крови участников эксперимента в его начале и после ежедневного тридцатидневного приема *per os* водорослевого геля из *Hedophyllum bongardianum*

Table 1. Relative (%) content of leukocytes in the blood of individuals who took part in the experiments, at their beginning and after a daily thirty-day intake *per os* of the algalgel from *Hedophyllum bongardianum*

Этап эксперимента	Лимфоциты	Нейтрофилы палочко-ядерные	Нейтрофилы сегментоядерные	Моноциты	Эозинофилы	Базофилы
Начало	19,6 ± 1,8	7,3 ± 0,6	54,1 ± 5,3	10,2 ± 0,9	7,1 ± 0,7	1,7 ± 1,0
Конец	27,4 ± 2,5	4,1 ± 0,4	56,3 ± 5,1	7,6 ± 0,6	3,9 ± 0,3	0,7 ± 0,5
Границы нормы	19-37	1-5	47-72	2-10	1-5	0.1-1

Ее анализ показывает, что в начале эксперимента относительное содержание лимфоцитов в пробах крови было близко к нижней границе нормы. Для всех остальных типов лейкоцитов, кроме сегментоядерных нейтрофилов, оно превышало их нормативные значения. Таким образом, состояние лейкоцитарного звена у обследованных лиц квалифицировалось как эозино- и базофилия и характеризовалось как напряженное. Средние показатели лейкоцитарной формулы у лиц, дошедших до конца эксперимента, как видно из табл. 1, заметно изменились. В ней нормализовалось содержание моноцитов, эозинофилов и базофилов, увеличилось количество лимфоцитов и сегментоядерных нейтрофилов и стало меньше палочкоядерных нейтрофилов.

Проведенное исследование, таким образом, продемонстрировало, что водорослевый гель даже в небольшой дозе (15 г в сутки) оказал заметное благотворное влияние на иммунитет обследованных лиц. Показатели неспецифической резистентности к концу эксперимента заметно улучшились (табл. 2). В ней представлены средние показатели ФАН, ФЧ и СФ. Их значения в конце эксперимента были приняты за 100 %, а начальные показаны как доля от 100 %. Из таблицы видно, что альгогель оказал заметное действие на функциональную активность

нейтрофилов и усилил их поглотительную способность. Так, увеличение ФАН составило 32 %, ФЧ –10 %, СФ –14 %.

Таблица 2. Фагоцитарная активность нейтрофилов (ФАН, %), фагоцитарное число (ФС, ед.) и сумма фагоцитоза (СФ, ед.) у участников эксперимента в его начале и конце, после тридцатидневного приема *per os* водорослевого геля из *Hedophyllum bongardianum*, выраженные в относительных (%) показателях

Table 2. Phagocytic activity of neutrophils (PAN), phagocytic number (PN) and the sum of phagocytosis (SP) of the persons taking part in the experiments, at their beginning and after a daily thirty-day intake *per os* of the algalgel from *Hedophyllum bongardianum* expressed in relative (%) terms

Этап эксперимента	ФАН, %	ФЧ, ед.	СФ, ед.
Начальный, до приема водорослевого геля	68	90	86
После тридцатидневного приема водорослевого геля	100*	100*	100*

*Примечание. Максимальные значения показателей, принятые за 100 %

*Note. The maximum values of the indicators taken as 100 %

Эксперименты с пробами крови должны были выявить эффективность воздействия НПП из разных видов и влияние на активность фагоцитоза их разных концентраций: 0,25; 0,5; 1 и 2,5; 10 и 15 %. Тестирование растворов показало, что на концентрацию 0,25 % нейтрофилы не реагируют, концентрации 5 % и выше приводят к супрессии фагоцитоза и что действующими являются только растворы экстрактов, разведенные до 0,5; 1 и 2 %.

Т. А. Кузнецова [7] и Н. Н. Беседнова [21] с соавторами для модулирования функциональной активности клеток врожденного иммунитета использовали сульфатированные полисахариды *Fucus distichus*, выделенные в чистом виде, и продукты их ферментативной трансформации. Их эксперименты показали, что фагоцитоз нейтрофилов усиливается за счет активации рецепторов клеточных мембран. Праймирование нами нейтрофилов НПП из экстрактов *H. bongardianum* и *Alaria esculenta* также привело к усилению фагоцитоза [10]. В случае же изучения мазков крови, праймированной НПП из экстрактов *A. bifidus* и *L. repens*, было обнаружено, что бактерии подвергались инактивации не только путем фагоцитоза, но и иными способами – через формирование нейтрофильных ловушек (НЕТоз) и дегрануляцию. Так, при воздействии экстрактов *A. bifidus* они располагались и внутри (рис. 2. 1, 4), и снаружи клетки, в виде так называемых «виноградных гроздей» (рис. 2. 2–3), рядом с которыми, в межклеточном пространстве, бактерии и их остатки отсутствовали.

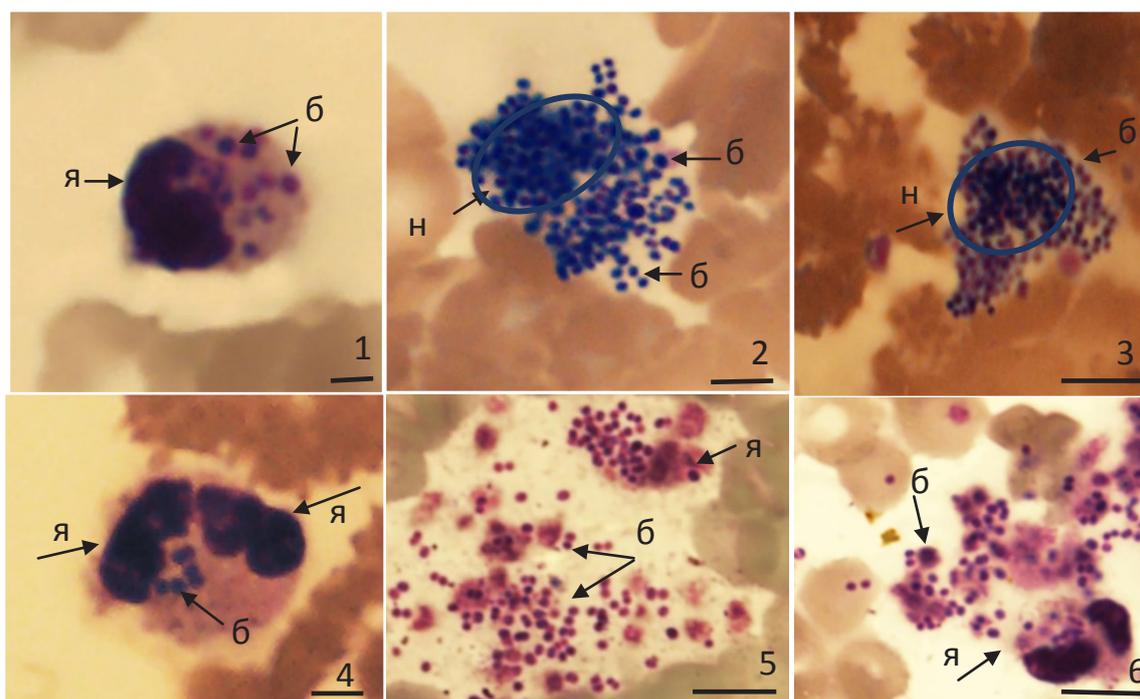


Рис. 2. Фагоцитирующие нейтрофилы. 1, 4 – внутриклеточное поглощение бактерий нейтрофилами в контрольных пробах. 2, 3 – внеклеточная инактивация бактерий нейтрофилами, активированными НПП водных экстрактов из *Arthrothamnus bifidus*, 5,6 – внеклеточная инактивация бактерий нейтрофилами, активированными НПП водных экстрактов *Laminaria longipes*. Стрелками показаны сегментированные ядра нейтрофилов (я), бактериальные клетки (б), местоположение нейтрофила (н). Масштаб: 5 мкм

Fig. 2. Phagocytic neutrophils. 1, 4 – intracellular absorption of bacteria by neutrophils in control samples. 2, 3 – extracellular inactivation of bacteria by neutrophils activated by LPS of aqueous extracts from *Arthrothamnus bifidus*, 5,6 – extracellular inactivation of bacteria by neutrophils activated by LPS of aqueous extracts of *Laminaria repens*. The arrows show the segmented nuclei of neutrophils (я), bacterial cells (б), and the location of the neutrophil (н). Scale: 5 μm

Около половины нейтрофилов в пробах, праймированных НПП из *A. Bifidus*, сохраняли способность к фагоцитированию, но активность, как до, так и после приема геля, из-за НЕТоza была ниже, чем в контрольных пробах (табл. 3, 4). Результаты экспериментов с использованием экстрактов из разновозрастных образцов вида показали, что более эффективное праймирующее воздействие на нейтрофилы оказывали экстракты из второголетних растений.

Таблица 3. Влияние *in vitro* низкоконцентрированных праймирующих растворов (НПР) экстракта однолетних образцов *Arthrothamnus bifidus* на неспецифическую резистентность нейтрофилов крови, взятой у участников эксперимента на его разных этапах

Table 3. In vitro influence of low-concentration priming solutions (LPS) of an extract of annual samples of *Arthrothamnus bifidus* on nonspecific resistance of blood neutrophils taken from participants of the experiment at its different stages

Концентрация НПР	Соотношение экстракта и воды	Фагоцитарная активность нейтрофилов (ФАН, %)	Фагоцитарное число (ФЧ, ед.)	Сумма фагоцитоза (СФ, ед.)	Абсолютный фагоцитарный показатель (АФП, ед.)
Показатели до приема водорослевого геля					
2%	1/50	32,3 ± 3,2	3,5 ± 0,3	53,9 ± 5,0	51,8 ± 4,7
1%	1/100	31,6 ± 3,2	3,7 ± 0,3	55,3 ± 4,9	60,3 ± 5,8
0.5%	1/200	32,8 ± 3,3	4,1 ± 0,4	52,1 ± 4,8	51,7 ± 4,7
Физраствор (контроль)		41,5 ± 3,9	4,6 ± 0,4	71,5 ± 6,9	98 ± 9,3
Показатели после приема водорослевого геля					
2%	1/50	43,4 ± 4,0	4,3 ± 0,4	59,9 ± 5,7	78,4 ± 7,3
1%	1/100	43,5 ± 4,1	4,7 ± 0,4	71,3 ± 5,9	79,1 ± 7,3

Из табл. 3 видно, что внеклеточная инактивация кокков до и после приема геля сопровождалась фагоцитозом. Концентрация НПР на его активность особого влияния не оказывала, способность к фагоцитозу сохранял почти каждый третий нейтрофил. Из нижней части таблицы, в которой приводятся показатели неспецифической резистентности нейтрофилов после приема геля, видно, что все их значения, как в контрольной пробе, так и в пробах, праймированных НПР из экстракта *A. bifidus*, возрастают. Это свидетельствует о его благотворном влиянии на состояние иммунитета участников эксперимента.

Таблица 4. Влияние *in vitro* низкоконцентрированных праймирующих растворов (НПР) экстракта второгодних образцов *Arthrothamnus bifidus* на неспецифическую резистентность нейтрофилов крови, взятой у участников эксперимента на его разных этапах

Table 4. In vitro influence of low-concentration priming solutions (LPS) of an extract of second-year samples of *Arthrothamnus bifidus* on nonspecific resistance of blood neutrophils taken from participants of the experiment at its different stages

Концентрация НПР	Соотношение экстракта и воды	Фагоцитарная активность нейтрофилов (ФАН, %)	Фагоцитарное число (ФЧ, ед.)	Сумма фагоцитоза (СФ, ед.)	Абсолютный фагоцитарный показатель (АФП, ед.)
Показатели до приема водорослевого геля					
2%	1/50	50,8 ± 5,2	3,1 ± 0,3	50,9 ± 5,0	55,1 ± 5,0
1%	1/100	48,9 ± 4,7	3,5 ± 0,3	59,5 ± 5,5	60,3 ± 5,8
0.5%	1/200	51,3 ± 5,1	3,2 ± 0,3	53,7 ± 5,2	57,4 ± 5,7
Физраствор (контроль)		41,5 ± 3,9	4,6 ± 0,4	71,5 ± 6,9	98,1 ± 9,3

Показатели после приема водорослевого геля					
2%	1/50	71,9 ± 7,0	3,3 ± 0,3	72,9 ± 6,7	81.2 ± 7,5
1%	1/100	74,2 ± 7,1	3,0 ± 0,3	75,6 ± 6,9	80.3 ± 7,3
0.5%	1/200	66,8 ± 6,5	3,3 ± 0,3	74,7 ± 6,9	78.5 ± 7,8
Физраствор (контроль)		53,8 ± 5,1	5,1 ± 0,5	81,4 ± 7,2	116.4 ± 10,9

Если при активации НПП экстрактов однолетних представителей *A. bifidus* фагоцитирующую активность имели около 30 % нейтрофилов, то под воздействием НПП экстрактов двухлетних образцов их количество заметно возросло. В начале оно было близко к половине, а после тридцатидневного употребления геля стало еще большим. Сравнить между собой праймирующее влияние растворов из разновозрастных слоевищ достаточно трудно, поскольку инактивация патогенов осуществлялась как внутри клеток, так и за их пределами. Вместе с тем данные таблиц 3 и 4 показывают, что внутриклеточное поглощение бактерий более эффективно активировалось НПП экстракта из пластин второго года жизни.

В пробах, праймированных растворами экстрактов *L. repens*, наряду с фагоцитозом также наблюдалась внеклеточная инактивация бактерий, известная как дегрануляция (рис. 2, 5–6). О том, что имела место именно данная форма их уничтожения, мы судим по отсутствию вокруг нейтрофилов их компактных скоплений, очень рыхлом расположении, а также наличию большого количества «мусора» – частично переваренных бактерий. Это особенно видно на рис. 2. 5. В начале и в конце эксперимента с использованием НПП образцов *L. repens* первого года жизни среднее количество кокков внутри фагоцитирующих нейтрофилов оказалось меньшим, чем в контрольной пробе (табл. 5). К концу эксперимента, после приема геля, их неспецифическая резистентность заметно возросла, но также не превысила таковую в контрольной пробе, что объясняется тем, что в уничтожении бактерий были задействованы два разных механизма – собственно фагоцитоз, который отражен в цифрах в таблицах 5–6, и дегрануляция.

Таблица 5. Влияние *in vitro* низкоконцентрированных праймирующих растворов (НПП) экстракта однолетних образцов *Laminaria repens* на неспецифическую резистентность нейтрофилов крови, взятой у участников эксперимента на его разных этапах

Table 5. In vitro influence of low-concentration priming solutions (LPS) of an extract of annual samples of *Laminaria repens* on nonspecific resistance of blood neutrophils taken from participants of the experiment at its different stages

Концентрация НПП	Соотношение экстракта и воды	Фагоцитарная активность нейтрофилов (ФАН, %)	Фагоцитарное число (ФЧ, ед.)	Сумма фагоцитоза (СФ, ед.)	Абсолютный фагоцитарный показатель (АФП, ед.)
Показатели до приема водорослевого геля					
2%	1/50	34,9 ± 3,3	3,3 ± 0,3	50,5 ± 5,0	48,5 ± 4,5
1%	1/100	32,7 ± 3,2	3,8 ± 0,3	55,8 ± 4,9	57,8 ± 5,5
0.5%	1/200	33,6 ± 3,3	3,6 ± 0,3	49,9 ± 4,8	49,9 ± 4,7
Физраствор (контроль)		41,5 ± 3,9	4,6 ± 0,4	71,5 ± 6,9	98.1 ± 9,3

Показатели после приема водорослевого геля					
2%	1/50	42,2 ± 4,0	4,3 ± 0,4	59,4 ± 5,7	75,8 ± 7,3
1%	1/100	39,9 ± 3,9	4,4 ± 0,4	62,3 ± 5,9	73,9 ± 6,9
0.5%	1/200	40,1 ± 3,9	4,9 ± 0,4	60,5 ± 6,0	84,1 ± 7,2
Физраствор (контроль)		53,8 ± 5,1	5,1 ± 0,5	81,4 ± 7,2	116,4 ± 10,9

Аналогичная картина наблюдалась и при активации крови участников эксперимента НПП экстрактом из образцов *L. repens* второго года жизни (табл. 6).

Таблица 6. Влияние *in vitro* низкоконцентрированных праймирующих растворов (НПП) экстракта второгодних образцов *Laminaria repens* на неспецифическую резистентность нейтрофилов крови, взятой у участников эксперимента на его разных этапах

Table 6. In vitro influence of low-concentration priming solutions (LPS) of an extract of second-year samples of *Laminaria repens* on nonspecific resistance of blood neutrophils taken from participants of the experiment at its different stages

Концентрация НПП	Соотношение экстракта и воды	Фагоцитарная активность нейтрофилов (ФАН, %)	Фагоцитарное число (ФЧ, ед.)	Сумма фагоцитоза (СФ, ед.)	Абсолютный фагоцитарный показатель (АФП, ед.)
Показатели до приема водорослевого геля					
2%	1/50	43,8 ± 4,2	3,5 ± 0,3	51,9 ± 5,0	64,6 ± 4,7
1%	1/100	46,3 ± 4,1	3,7 ± 0,3	56,8 ± 4,9	69,3 ± 5,8
0.5%	1/200	41,8 ± 3,9	4,1 ± 0,4	51,1 ± 4,8	63,7 ± 4,7
Физраствор (контроль)		41,5 ± 3,9	4,6 ± 0,4	71,5 ± 6,9	98,1 ± 9,3
Показатели после приема водорослевого геля					
2%	1/50	52,4 ± 4,0	3,9 ± 0,4	59,9 ± 5,7	81,1 ± 7,8
1%	1/100	55,1 ± 5,1	4,1 ± 0,4	72,3 ± 5,9	93,4 ± 8,3
0.5%	1/200	51,3 ± 4,9	4,9 ± 0,5	73,6 ± 6,0	92,5 ± 7,9
Физраствор (контроль)		53,8 ± 5,1	5,1 ± 0,5	81,4 ± 7,2	116,4 ± 10,9

Сравнение показателей неспецифической резистентности нейтрофилов (табл. 5, 6) свидетельствует о большей эффективности воздействия водорастворимых соединений, содержащихся в экстракте *L. repens* старшей возрастной группы. Это неудивительно, поскольку в природных популяциях ламинариевых водорослей разные возрастные генерации демонстрируют неповторимую стратегию развития. На первом году жизни их организм настроен, прежде всего, на увеличение линейных размеров, формирование черешков и органов прикрепления. Линейный рост, сопровождаемый активным цитокинезом, приводит к высокому расходу пластических веществ, что не способствует их накоплению. Содержание фукоиданов, играющих большую роль в процессах размножения ламинариевых, в этот период у первогодних растений заметно ниже в связи с тем, что вклад их представителей в воспроизводство популяции не такой весомый, как у более взрослых растений, их размножение к тому же происходит позднее. Именно этим мы можем объяснить различия в иммуномодулирующем действии НПП экстрактов из разновозрастных представителей *A. bifidus* и *L. repens*.

Медико-биологические исследования последних десятилетий показывают, что помимо фагоцитирования нейтрофилы могут инактивировать патогенные организмы путем дегрануляции и с помощью выброса в цитоплазму так называемых нейтрофильных внеклеточных ловушек. При фагоцитозе имеет место поглощение чужеродных агентов внутрь клетки с формированием вакуоли, в которой образуются высокотоксичные для патогена формы кислорода. В последующем путем слияния вакуолей с внутриклеточными гранулами внутри клетки формируются фагосомы, включающие широкий спектр протеолитических ферментов и антибактериальных пептидов с высоким цитотоксическим действием.

В ходе дегрануляции стратегия уничтожения бактерий иная. Она направлена на выделение содержащихся в гранулах нейтрофилов антибактериальных веществ и ферментов во внеклеточное пространство и устранение инфекции за пределами клетки. В связи с тем, что химический состав гранул по мере перехода нейтрофилов от стадии промиелоцитов к стадии зрелых сегментоядерных форм постепенно меняется, в цитоплазму и во внеклеточное пространство поступают все новые токсичные для микроорганизмов компоненты. Нейтрофильные внеклеточные ловушки формируются деконденсированными хроматиновыми нитями, состоящими из полимеров нуклеиновых кислот, связанных с гистонами, гранулярными антимикробными пептидами и ферментами [22, 23]. Ядра фагоцитов в таких случаях наряду с функцией хранения генетической информации выполняют эффекторную роль в отношении патогенов и, следовательно, являются частью врожденного иммунитета [24].

В одних случаях формирование нейтрофильных внеклеточных ловушек сопровождается гибелью исходных клеток. Этот тип взаимодействия нейтрофилов с патогенами получил название «суицидальный НЕТоз» [25]. Его альтернативной формой является прижизненный, или витальный НЕТоз – внеклеточный выброс хроматина, после которого исходные клетки сохраняют способность к фагоцитозу [24].

Изучение механизмов формирования нейтрофильных внеклеточных ловушек показывает, что его индуцируют разные факторы, в том числе воздействие определенных химических соединений. В настоящее время известно, что среди содержащихся у водорослей органических веществ активное праймирующее воздействие оказывают сульфатированные полисахариды. Они, как известно, даже у одного и того же биологического вида не имеют постоянных молекулярной массы и структуры и зависят от возраста, фенологической фазы развития, условий произрастания. У большинства ламинариевых они обладают сложной структурой, лишенной регулярности. Это затрудняет определение взаимосвязи между ней и биологической активностью [26]. Особенности молекулярной организации фукоиданов, кроме того, значительно изменяются от вида к виду. У *A. bifidus* и *L. repens* они до сих пор не исследованы.

Результаты изучения праймирующего действия препаратов из камчатских бурых водорослей, как это было показано выше, свидетельствуют об их благотворном влиянии на состояние иммунной системы человека. Эксперимент с длительным ежедневным использованием *per os* водорослевого геля из *H. bongardianum* косвенно указывает на то, что содержащиеся в нем в легкодоступной форме вещества способны проникать из желудочно-кишечного тракта в кровеносное русло и изменять лейкоцитарную формулу крови в сторону нормализации коли-

чественного содержания в ней всех типов лейкоцитов. Добавление в кровь НПР водорослевых водных экстрактов активизирует подавление инородных агентов. Об этом свидетельствуют различия показателей неспецифической резистентности нейтрофилов между контрольными пробами и праймированными пробами в экспериментах *in vitro*.

Изучение иммуномодулирующего действия экстрактов *A. bifidus* и *L. repens* показало, что их добавление в кровь приводит к проявлению у нейтрофилов разных стратегий инактивации бактерий. Так, если в экспериментах с другими видами камчатских водорослей – *F. distichus*, *H. bongardianum* и *A. esculenta* – имел место только процесс внутреннего поглощения и переваривания бактерий [15], то в ходе настоящего исследования, как сказано выше, была обнаружена их инактивация как внутри, так и за пределами нейтрофилов.

НПР экстракта *A. bifidus*, по нашему мнению, индуцирует формирование нейтрофильных внеклеточных ловушек. Говорить об этом определенно можно было бы по результатам окрашивания гематологических препаратов специальным флуоресцентным красителем, но он у нас, к сожалению, отсутствовал. Изучение мазков крови показывает, что ловушки формирует далеко не каждый нейтрофил, некоторая их часть продолжает фагоцитировать. Возможно, процесс инактивации бактерий растянут во времени и фагоцитирующие нейтрофилы по мере формирования и функционирования внеклеточных ловушек деградируют. Ответить на этот вопрос могут только дополнительные эксперименты.

НПР из *L. repens*, как было показано выше, вызывают процессы дегрануляции нейтрофилов. До сих пор в публикациях, освещающих результаты изучения праймирующего воздействия на нейтрофилы водорослевых препаратов, отмечалось, что они стимулируют их способность инактивировать бактерии путем их поглощения и внутриклеточного переваривания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты свидетельствуют о положительном влиянии водорослевых препаратов из *H. bongardianum*, *A. bifidus* и *L. repens* на функциональную активность нейтрофилов. Иммуномодулирующий эффект при этом зависит от концентрации НПР. У двух последних видов она лежит в узком диапазоне – 0,5–2 %. Больше или меньше разведение водорослевых экстрактов сводит влияние праймирующих растворов на нет или приводит к обратному эффекту – подавлению деятельности нейтрофилов. Узость этого диапазона необходимо учитывать при проведении экспериментов по изучению иммуномодулирующего эффекта, вызываемого воздействием экстрактов водорослей или выделенных из них в чистом виде биологически активных веществ.

Фагоцитарная активность нейтрофилов меняется не только в зависимости от вида водоросли, отобранной для получения экстракта, во многом она зависит от возраста образцов, взятых для их получения. Это необходимо учитывать в последующем при выборе сырья для использования в аналогичных научных исследованиях и клинической практике.

Механизмы усиления подавления нейтрофилами чужеродных организмов под воздействием экстрактов из изученных нами ламинариевых водорослей отличаются от прежде известных по литературным данным. Наряду с фагоцитозом

они индуцируют процессы внеклеточного подавления бактерий, и это обнаружено нами впервые.

В целом же проведенное исследование показывает, что камчатские бурые водоросли *H. bongardianum*, *A. bifidus* и *L. repens* могут с успехом использоваться для производства БАДов с эффективным иммуномодулирующим действием.

Список источников

1. Морские водоросли в восстановительной комплексной терапии с нарушением метаболизма / А. Н. Вялков [и др.]. М.: МДВ, 2006. 106 с.
2. Кусакин О. Г., Иванова М. Б. Макрофитобентос литоральных сообществ о-ва Медный (Командорские острова) // Биология моря. 1995. Т. 21. № 2. С. 99–107.
3. Подкорытова А. В., Рощина А. Н. Морские бурые водоросли – перспективный источник БАВ для медицинского, фармацевтического и пищевого применения // Труды ВНИРО. 2021. Т. 186. № 4. С. 56–172.
4. Морские бурые водоросли – источник новых фармацевтических субстанций антибактериальной направленности / Н. Н. Беседнова [и др.] // Антибиотики и химиотерапия. 2015. Т. 60. № 3–4. С. 31–41.
5. Альгинаты в профилактике внутреннего облучения стронцием / В. И. Корзун [и др.] // Медицинская радиология. 1992. № 3. С. 31–34.
6. Бордин Д. С., Валитова Э. Р., Эмбутниекс Ю. В. Альгинаты в лечении гастроэзофагеальной рефлюксной болезни // Эффективная фармакотерапия. 2020. Т. 16. № 1. С. 12–18.
7. Влияние сульфатированных полисахаридов из бурой водоросли *Fucus evanescens* и продукта их ферментативной трансформации на функциональную активность клеток врожденного иммунитета / Т. А. Кузнецова [и др.] // Антибиотики и химиотерапия. 2016. Т. 61. № 7–8. С. 10–14.
8. Усольцева Р. В., Звягинцева Т. Н., Ермакова С. П. Структурное разнообразие ламинаранов бурых водорослей, перспективы их использования // Вестник ДВО РАН. 2019. Т. 5. № 207. С. 84–89.
9. Перспективы использования промысловых и потенциально промысловых бурых водорослей дальневосточных морей в качестве источника полифенолов / Н. М. Аминина [и др.] // Биология моря. 2020. Т. 46. № 1. С. 37–44.
10. Перервенко О. В., Меджидова Х. М., Клочкова Н. Г. Модуляция фагоцитарной активности нейтрофилов препаратами из камчатских бурых водорослей // Вестник Камчатского государственного технического университета. 2023. Вып. 65. С. 43–53.
11. Klimova A. V., Klochkova T. A., Klochkova N. G. Taxonomic revision of kelp species with rhizome-like holdfast, *Laminaria longipes* Bory and *Laminaria repens* Ruprecht, from Russian Far Eastern seas // Botanica pacifica. A journal of plant science and conservation. 2023. V. 12. N 1. С. 151–163.
12. Клочкова Т. А., Салтанова Н. С. Деструкция тканей бурой водоросли *Saccharina bongardiana* в процессе термощелочной обработки при получении биогеля // Вестник Камчатского государственного технического университета. 2020. Вып. 52. С. 27–39.

13. Лабораторные методы исследования в клинике: Справочник / В. В. Меньшиков [и др.]. М.: Медицина, 1987. 368 с.
14. Коваленко П. П., Лымарь Н. П., Коваленко А. П. Экспресс-способ подбора антибиотиков при гнойной инфекции. Ростов.: РГМИ. 1988. 48 с.
15. Огородников В. С. Водоросли-макрофиты Северных Курильских островов: автореф. дис. ... канд. биол. наук. 03.00.18. Петропавловск-Камчатский. 2007. 25 с.
16. Евсеева Н. В. Распределение водорослей порядка Laminariales в прибрежной зоне Южных Курильских островов // Растит. ресурсы. 2019. Т. 55. № 1. С. 5–22.
17. Ключкова Н. Г., Ключкова Т. А. Состав, распределение, запасы и промысел макрофитов в прибрежье Камчатки // Ресурсы и рациональное использование морских водорослей и морских трав дальневосточных морей России / под ред. В. Н. Окулина. Владивосток: ТИНРО, 2020. С. 122–137.
18. Возжинская В. Б. Морские водоросли западного побережья Камчатки // Новости систематики низших растений. 1965. Т. 2. С. 73–78.
19. Кусакин О. Г., Иванова М. Б. Макрофитобентос литоральных сообществ о-ва Медный (Командорские острова) // Биология моря. 1995. Т. 21. № 2. С. 99–107.
20. Суховеева М. В. Подкорытова А. В. Промысловые водоросли и травы морей Дальнего Востока: биология, распространение, запасы, технология переработки. Владивосток: ТИНРО, 2006. 243 с.
21. Сульфатированные полисахариды морских водорослей как потенциальные средства профилактики и терапии гриппа и COVID-19 / Н. Н. Беседнова [и др.] // Антибиотики и химиотерапия. 2021. Т. 66. № 7–8. С. 50–66.
22. Кравцов А. Л. Формирование внеклеточных ловушек – эффективный механизм защиты организма от патогена // Проблемы особо опасных инфекций. 2012. № 112. С. 69–74.
23. Защитные стратегии нейтрофильных гранулоцитов от патогенных бактерий / Б. Г. Андрюков, Л. М. Сомова, Е. И. Дробот, Е. В. Матосова // Здоровье. Медицинская экология. Наука. 2017. Т. 1. № 68. С. 4–18.
24. Воробьева Н. В. Нейтрофильные ловушки: новые аспекты // Вестник Моск. ун-та. Сер. 16. Биология. 2020. Т. 75. № 4. С. 210–225.
25. Neutrophil extracellular traps kill bacteria / V. Brinkmann [et al.] // Science. 2004. V. 303 N 5663. С. 1532–1535.
26. Фукоиданы бурых водорослей: влияние элементов молекулярной архитектуры на функциональную активность / С. Р. Хильченко [и др.] // Антибиотики и химиотерапия. 2018. Т. 63. № 9–10. С. 69–79.

References

1. Vyalkov A. N., Kozlov V. K., Bobrovnitskiy A. I. *Morskie vodorosli v vosstanovitel'noy kompleksnoy terapii s narusheniem metabolizma* [Seaweed in the regenerative medicine, complex therapy of diseases with metabolic disorders]. Moscow, MDV, 2006. 106 p.
2. Kusakin O. G., Ivanova M. B. Makrofitobentos litoral'nykh soobshchestv ostrova Mednyy (Komandorskie ostrova) [Macrophytobentos of littoral communities of

Medny Island (Commanders Islands)]. *Biologia morya*. 1995. Vol. 21, no. 2, pp. 99–107.

3. Podkorytova A. V., Roshchina A. N. Morskie burye vodorosli – perspektivnyy istochnik BAV dlya meditsinskogo, farmatsevticheskogo i pishchevogo primeneniya [Marine brown algae – perspective source of BAS for medical, pharmaceutical and food use]. *Trudy VNIRO*. 2021. Vol. 186, no. 4, pp. 156–172.

4. Besednova N. N., Kuznetsova T. A., Zaporozhets T. S., Zvyagintseva T. N. Morskie burye vodorosli – istochnik novykh farmacevticheskikh substantsiy antibakterial'noy napravlenosti [Brown seaweeds as a source of new pharmaceutical substances with antibacterial action]. *Antibiotiki i khimioterapiya*. 2015. Vol. 60, no. 3–4, pp. 31–41.

5. Korzun V. I., Voronova Yu. G., Parats A. I., Rogalskaya L. A., Podkorytova A. V. Al'ginaty v profilaktike vnutrennego oblucheniya strontsiem [Alginates in the prevention of internal strontium irradiation]. *Meditsinskaya radiologiya*. 1992, no. 3, pp. 31–34.

6. Bordin D. S., Valitova E. R., Embutnieks Yu. V. Al'ginaty v lechenii gastroezofageal'noy reflyuksnoy bolezni [Alginates in the treatment of gastroesophageal reflux disease]. *Effektivnaya farmakoterapiya*. 2020. Vol. 16, no. 1, pp. 12–18.

7. Kuznetsova T. A., Smolina T. P., Besednova N. N., Silchenko A. S. Vliyanie sul'fatirovannykh polisakharidov iz buroy vodorosli *Fucus evanescens* i produkta ikh fermentativnoy transformatsii na funktsional'nyu aktivnost' kletok vrozhdennoho immuniteta [Effect of sulfated polysaccharides from brown algae *Fucus evanescens* and their enzymatic transformation product on the functional activity of innate immunity cells]. *Antibiotiki i khimioterapiya*. 2016. Vol. 61, no. 7–8, pp. 10–14.

8. Usoltseva R. V., Zvyagintseva T. N., Ermakova S. P. Strukturnoe raznoobraziye laminaranov burykh vodorosley, perspektivy ikh ispol'zovaniya [The structural diversity of laminarans of brown algae. Prospects for use of laminarans]. *Vestnik DVO RAN*. 2019. Vol. 5, no. 207, pp. 84–89.

9. Aminina N. M., Vishnevskaya T. I., Karaulova E. N., Epur V. P., Yakush E. V. Perspektivy ispol'zovaniya promyslovykh i potentsial'no promyslovykh burykh vodorosley dal'nevostochnykh morey v kachestve istochnika polifenolov [Prospects for the use of commercial and potentially commercial brown algae of the Far Eastern seas as a source of polyphenols]. *Biologiya morya*. 2020. Vol. 46, no. 1, pp. 37–44.

10. Perervenko O. V., Medzhidova Kh. M., Klochkova N. G. Modulyatsiya fagotsitarnoy aktivnosti neytrofilov preparatami iz kamchatskikh burykh vodorosley [Modulation of phagocytic activity of neutrophils by preparations from Kamchatka brown algae]. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2023. Iss. 65, pp. 43–53.

11. Klimova A. V., Klochkova T. A., Klochkova N. G. Taxonomic revision of kelp species with rhizome-like holdfast, *Laminaria longipes* Bory and *Laminaria repens* Ruprecht, from Russian Far Eastern seas. *Botanica Pacifica. A journal of plant science and conservation*. 2023. Vol. 12, no. 1, pp. 151–163.

12. Klochkova T. A., Saltanova N. S. Destruktsiya tkaney buroy vodorosly *Saccharina bongardiana* v protsesse termoshchelochnoy obrabotki pri poluchenii biogelya [Tissue destruction in the brown alga, *Saccharina bongardiana*, during the process of

thermal-alkalin treatment when producing biogel]. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2020, iss. 52, pp. 27–39.

13. Menshikov V. V. [et al.]. *Laboratornye metody issledovaniya v klinike: spravochnik* [Laboratory methods of research in clinic: handbook]. Moscow, Meditsina. 1987. 368 p.

14. Kovalenko P. P., Lymar N. P., Kovalenko A. P. *Ekspress-sposob podbora antibiotikov pri gnoynoy infektsii* [Express method of selecting antibiotics for purulent infection]. Rostov, RGMU. 1988. 48 p.

15. Ogorodnikov V. S. *Vodorosli-makrofity Severnykh Kuril'skikh ostrovov. Avtoreferat diss. dokt. biol. nauk* [Macrophyte algae of the Northern Kuril Islands. Abstract of dis. dr. boil. sci.]. Petropavlovsk-Kamchatsky, 2007, 25 p.

16. Evseeva N. V. *Raspredelenie vodorosley poryadka Laminariales v pribrezhnoy zone Yuzhnykh Kuril'skikh ostrovov* [The distribution of Laminariales in the sublittoral zone of the Southern Kuril Islands]. *Rastitelnye resursy*. 2019, vol. 55, no. 1, pp. 5–22.

17. Klochkova N. G., Klochkova T. A. *Sostav, raspredelenie, zapasy i promysel makrofitov v pribrezh'e Kamchatki* [Composition, distribution, reserves and fishing of macrophytes in the coastal zone of Kamchatka]. *Resursy i ratsional'noe ispol'zovanie morskikh vodorosley i morskikh trav dal'nevostochnykh morey Rossii* [Resources and rational use of seaweed and sea grasses of the Far Eastern seas of Russia]. Vladivostok, TINRO, 2020, pp. 122–137.

18. Vozzhinskaya V. B. *Morskie vodorosli zapadnogo poberezh'ya Kamchatki* [Marine algae of the western coast of Kamchatka]. *Novosti sistematiki nizshikh rasteniy*. 1965, no. 2, pp. 73–78.

19. Kusakin O. G., Ivanova M. B. *Makrofitobentos litoral'nykh soobshchestv o-va Mednyy (Komandorskie ostrova)* [Macrophytobenthos of littoral communities of the Medny Island (Commander Islands)]. *Biologia morya*. 1995, vol. 21(2), pp. 99–107.

20. Sukhoveeva M. V., Podkorytova A. V. *Promyslovye vodorosli i travy morey Dal'nego Vostoka: biologiya, rasprostranenie, zapasy, tekhnologiya pererabotki* [Commercial algae and herbs of the Far-Eastern seas: biology, distribution, stocks, processing technology]. Vladivostok, TINRO, 2006, 243 p.

21. Besednova N. N. [et al.]. *Sul'fatirovannye polisakharidy morskikh vodorosley kak potentsial'nye sredstva profilaktiki i terapii grippa i COVID-19* [Seaweed sulfated polysaccharides as potential pigents for prevention and preatment of influenza and COVID-19]. *Antibiotiki i khimioterapiya*. 2021, vol. 66, no. 7–8, pp. 50–66.

22. Kravtsov A. L. *Formirovanie vnekletochnykh lovushek – effektivnyy mekhanizm zashchity organizma ot patogena* [Formation of extracellular traps – the effective mechanism of organism protection from pathogen]. *Problemy osobo opasnykh infektsiy*. 2012, no. 112, pp. 69–74.

23. Andryukov B. G., Somova L. M., Drobot E. I., Matosova E. V. *Zashchitnye strategii neytrofil'nykh granulotsitov ot patogennykh bakteriy* [Protective strategies of neutrophil granulocytes against pathogenic bacteria]. *Zdorov'e. Meditsinskaya ekologiya. Nauka*. 2017, vol. 1, no. 68, pp. 4–18.

24. Vorob'yeva N. V. *Neytrofil'nye lovushki: novye aspekty* [Neutrophil extracellular traps: new aspects]. *Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 16. Biologiya*. 2020, vol. 75, no. 4, pp. 210–225.

25. Brinkmann V., Reichard U., Goosmann C., Fauler B., Uhlemann Y., Weiss D. S., Weinrauch Y., Zychlinsky A. Neutrophil extracellular traps kill bacteria. *Science*. 2004, vol. 303, no. 5663, pp. 1532–1535.

26. Khil'chenko S. R., Zaporozhets T. S., Zvyagintseva T. N., Shevchenko N. N., Besednova N. N. Fukoidany burykh vodorosley: vliyanie elementov molekulyarnoy arkhitektury na funktsional'nyuyu aktivnost' [Fucoidans from brown algae: influence of molecular architecture features on functional activity]. *Antibiotiki i khimioterapiya*. 2018, vol. 63, no. 9–10, pp. 69–79.

Информация об авторах

О. В. Перервенко – врач клинической лабораторной диагностики

Н. Г. Клочкова – доктор биологических наук

Information about the authors

O. V. Perervenko – clinical laboratory diagnostics doctor

N.G. Klochkova – Doctor of Biology

Статья поступила в редакцию 25.09.2023; одобрена после рецензирования 28.09.2023; принята к публикации 05.10.2023.

The article was submitted 25.09.2023; approved after reviewing 28.09.2023; accept for publication 05.10.2023.

Научная статья

УДК 504.45.058: 574.52: 574.63: 581.526.325

DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-56-70

Экологическое состояние пруда Шенфлиз как пример характеристики водоема карьерного типа в условиях рекреационной нагрузки

Екатерина Александровна Севостьянова¹, Александр Сергеевич Меньшенин², Оксана Владимировна Казимирченко³, Надежда Александровна Цупикова⁴, Олеся Сергеевна Суэтина⁵

^{1,2,3,4,5}Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

¹ekaterina.lozitskaya@klgtu.ru

²aleksandr.menshenin@klgtu.ru

³oksana.kazimirchenko@klgtu.ru

⁴tsoupikova@klgtu.ru

⁵olesya.bugranova@klgtu.ru

Аннотация. Целью настоящего исследования являлась оценка экологического состояния водоема карьерного происхождения по результатам комплексных наблюдений в период повышенной рекреационной нагрузки. В ходе полевых выездов было отобрано 33 пробы воды на трех береговых станциях пруда Шенфлиз. По результатам проведенных гидрохимических, микробиологических и альгологических анализов сделаны выводы об экологическом состоянии исследованного водоема. По гидрохимическим показателям обнаружено несоответствие содержания кислорода нормативным значениям с выраженным различием между станциями. Биогенных элементов в воде растворено немного, в границах соответствующих рыбохозяйственных предельно-допустимых концентраций (ПДК). По санитарно-микробиологическим анализам обсемененность воды была низкой. Состав микрофлоры воды пруда Шенфлиз на протяжении всего периода наблюдения формировался за счет аэробных и факультативно-анаэробных палочковидных (62 %) и кокковых бактерий (38 %). Наибольшее число видов бактерий отмечали в летний и осенний сезоны года. Основу комплекса альгофлоры пруда составляли 75 видов и таксонов до рода. Средняя численность фитопланктона за время наблюдения варьировала в пределах 0,3–3,7 млн кл./л, биомасса – в пределах 0,5–4 мг/л. Пик развития водорослей наблюдали в сентябре. Согласно результатам проведенных комплексных исследований воды пруда Шенфлиз относятся к категории чистых. Результаты проведенного гидрохимического мониторинга по большинству параметров совпадают с установленными диапазонами значений для мезотрофных водоемов (по классу сапробности – олигосапробные воды). Полученные результаты позволяют предположить, что рекреационная нагрузка даже в условиях отсутствия проточности не является определяющим фактором в изменении экологического состояния пруда в летний период.

© Севостьянова Е. А., Меньшенин А. С., Казимирченко О. В., Цупикова Н. А., Суэтина О. С., 2023

Ключевые слова: карьеры, пруд Шенфлиз, экологическое состояние, альгологический анализ, микробиологический анализ, гидрохимическая характеристика.

Для цитирования: Севостьянова Е. А., Меньшенин А. С., Казимирченко О. В., Цупикова Н. А., Суэтина О. С. Экологическое состояние пруда Шенфлиз как пример характеристики водоема карьерного типа в условиях рекреационной нагрузки // Известия КГТУ. 2023. № 71. С. 56-70. DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-56-70

Original article

The ecological state of the Schoenflies pond as the example of a quarry-type reservoir's description under conditions of recreational load

Ekaterina A. Sevost'yanova¹, Aleksandr S. Menshenin², Oksana V. Kazimirchenko³, Nadezda A. Tsupikova⁴, Olesya S. Suetina⁵

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

¹ekaterina.lozitskaya@klgtu.ru

²aleksandr.menshenin@klgtu.ru

³oksana.kazimirchenko@klgtu.ru

⁴tsoupikova@klgtu.ru

⁵olesya.bugranova@klgtu.ru

Abstract. The purpose of this study was to assess the ecological state of a floated quarry based on the results of integrated observations during a period of increased recreational load. In 2019, during field trips, 33 water samples were taken at three shore stations of the Schoenflies pond. Based on the results of the hydrochemical, microbiological and algological analyzes, conclusions were drawn about the ecological state of the studied reservoir. According to hydrochemical indicators, a discrepancy between the oxygen content and standard values with a pronounced difference between stations was found. Nutrients dissolved in water is within MPC. According to sanitary and microbiological analyzes, contamination of water was low. Composition of the aquatic microflora of the Schoenflies pond throughout the entire observation period was formed by aerobic and facultative anaerobic rod-shaped (62%) and coccal bacteria (38%). The largest number of bacterial species was observed in summer and autumn. The basis of the algoflora complex of the pond was formed by 75 species and taxa up to the genus of departments. The average number of phytoplankton during the observation period varied within 0.3–3.7 million cells/l, biomass – 0.5–4 mg/l. The peak of algae development was observed in September. According to the results of comprehensive research, water of the Schoenflies pond belongs to the category of pure water. The results of the hydrochemical monitoring for most parameters comply with the established ranges for mesotrophic water bodies (according to the saprobity class, oligosaprobic waters). The results obtained suggest that the recreational load, even in the absence of flow, is not a determining factor in changing the ecological state of the pond in summer.

Keywords: quarries, Schoenflies pond, ecological state, algological analysis, microbiological analysis, hydrochemical characteristics.

For citation: Sevostyanova E. A., Menshenin A. S., Kazimirchenko O. V., Tsupikova N. A., Suetina O. S. The ecological state of the Schoenflies pond as the example of a quarry-type reservoir's description under conditions of recreational load // *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2023; (71):56-70. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-56-70

ВВЕДЕНИЕ

Карьеры по добыче строительных материалов обычно содержат ограниченный запас ресурсов и после выработки могут использоваться во всевозможных целях. Одним из основных направлений последующей рекультивации карьеров является создание водоемов различного назначения (рыбохозяйственного, социально-бытового, культурно-ландшафтного, противопожарного и др.). Для использования водоемов такого типа в рекреационных целях не только сама акватория, но и окружающая карьер территория после выработки должны быть восстановлены и представлять собой оптимально организованный и экологически сбалансированный ландшафт.

Пруд Шенфлиз – водоем карьерного происхождения, расположенный на южной окраине Калининграда. Длительное время водоем используется населением для отдыха и купания. В настоящее время санитарно-гигиенический статус пруда стабилен, но еще до недавнего времени использование водоема в купальных целях не рекомендовалось из-за обмеления, а в 2018 г. к концу летнего сезона купание было запрещено из-за неудовлетворительного качества воды [1].

Шенфлиз является средним по площади водного зеркала прудом (около 9,1 га) почти правильной треугольной формы, со слабоизрезанными и пологими берегами. Для пруда характерно увеличение глубины у берегов до 2–3 м, а также выровненное дно в центральной части водоема. Еще одна особенность – глубина более 5 м, все это указывает на важное отличие от естественных старичных и пойменных озер долины реки Преголи. Данные характеристики подтверждают искусственное происхождение пруда Шенфлиз [2].

Насыпной песчаный пляж, предназначенный для отдыха людей, площадью около 350 м² расположен на юго-восточном берегу пруда. Существуют и несанкционированные места купания, привлекающие отдыхающих, например, обрывистый берег на севере водоема. Помимо летнего отдыха Шенфлиз в течение всего года используется как площадка для спортивно-оздоровительных мероприятий. В последние годы прослеживается увеличение рекреационной нагрузки на водоем [3], в результате чего в настоящее время на одного отдыхающего приходится в среднем 1–5 м² пляжа, что не соответствует требованиям ГОСТ 17.1.5.02-80¹ относительно обеспеченности отдыхающих площадью пляжной зоны (не менее 8 м²). Наряду с пляжным отдыхом многие городские водоемы, включая Шенфлиз, активно используются для любительского рыболовства [4].

Целью работы являлось проведение комплексных гидрохимических и гидробиологических исследований, позволяющих оценить состояние карьер-

¹ГОСТ 17.1.5.02-80 «Охрана природы. Гидросфера. Гигиенические требования к зонам рекреации водных объектов». 1982. С. 102

ных водоемов под влиянием антропогенного воздействия на примере пруда Шенфлиз.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При подготовке настоящей работы отбор проб для выполнения гидрохимического, альгологического и микробиологического анализов проводился на трех станциях мониторинга: станция 1 – пляжная зона (54.66421, 20.53898), станция 2 – северная часть (неорганизованное место для купания) (54.6659, 20.5362), станция 3 – юго-западная окраина вблизи железной дороги (54.66278, 20.534767) (рис. 1). На гидрохимический анализ пробы воды отбирали² ежемесячно, преимущественно в утреннее время, для микробиологического и альгологического анализов – ежесезонно (май, июнь, сентябрь – до начала купального сезона, с его стартом и по окончании).



Рис. 1. Расположение станций на пруду Шенфлиз
Fig. 1. Location of stations on the Schoenflies pond

Гидрохимический анализ включал содержание растворенного кислорода, азота аммонийного, нитритов, фосфора фосфатов, железа общего, величину перманганатной окисляемости, pH [5]. Методами микробиологического анализа в воде устанавливали общее количество сапрофитных бактерий по показателю общего микробного числа воды, для оценки санитарного состояния водоема определяли бактерии группы кишечных палочек, изучали видовой состав микрофлоры [6–9]. Отбор, фиксирование и концентрирование проб фитопланктона, а также подсчет численности и биомассы проводили по стандартным гид-

²Р 52.24.353-2012. Рекомендации. Отбор проб поверхностных вод суши и очищенных сточных вод (утв. заместителем руководителя Росгидромета 10.05.2012) // Гарант [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/70757010/> (дата обращения 12.11.2021).

робиологическим методикам [10, 11]. Состояние водного объекта оценивалось согласно ГОСТ 17.1.2.04-77³, критериям распознавания трофности [12].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Гидролого-гидрохимическая характеристика

Пруд Шенфлиз – бессточный водоем, что при его небольшой площади (9,4 га), глубине (максимум 5,5 м) и объеме вод (до 300 тыс. м³) способствует формированию особых гидролого-гидрохимических условий [2].

Воды Шенфлиза в мае и сентябре 2019 г. были более прогреты, чем атмосферный воздух на протяжении декады до отбора проб. Конец апреля был ясным и теплым (температура воздуха поднималась выше 20 °С в дневные часы), что способствовало более раннему, чем обычно, прогреву воды в водоеме. Первая половина мая, напротив, была дождливой и более прохладной по сравнению с апрелем. В эти же месяцы наблюдались большие различия в течение декады, предшествовавшей отбору проб и непосредственно в день наблюдений. В летний период, с мая по июль, температура воды сохранялась примерно на одном уровне, плавно увеличиваясь к августу. Следует отметить, в пруду около 3,2 га занимают быстропрогреваемые мелководья (35 % от всей площади водоема), которые, несмотря на общее похолодание и снижение ночной температуры воздуха, успевают прогреваться в утренние часы до температуры, комфортной для купания людей (рис. 2).

Атмосферные осадки в малых бессточных водоемах оказывают прямое влияние на изменения объема вод в течение года. В 2019 году месячные суммы осадков были близки к климатической норме в начале исследования, в августе дождей было немного. В сентябре наблюдались обильные осадки, превышающие норму в 1,7 раза.

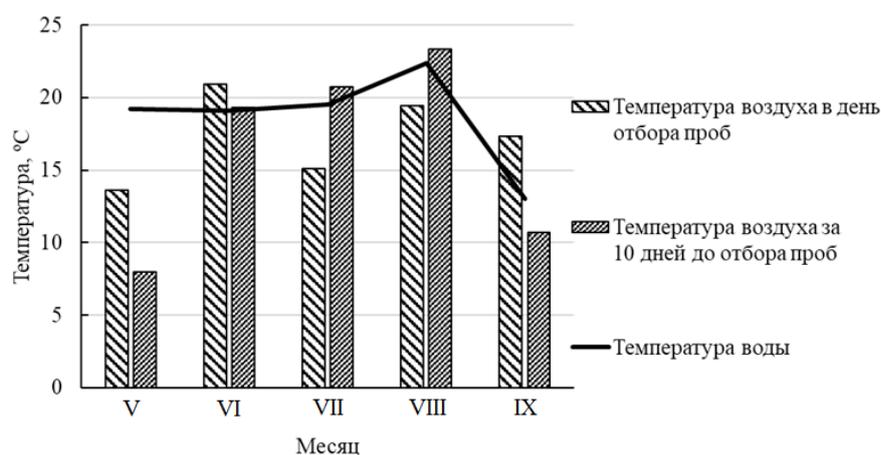


Рис. 2. Температура воды (средняя на трех станциях) и воздуха (°С) в 2019 г.
Fig. 2. Water (average at three stations) and air temperature (°С) in 2019

³ ГОСТ 17.1.2.04-77 «Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных водных объектов». Охрана природы. Гидросфера: Сб. ГОСТов. М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. С. 51–62.

Установлено несоответствие кислородных условий в пруду существующим нормативам для рыбохозяйственных водоемов, к которым относится Шенфлиз. В июне и июле в утренние часы содержание кислорода снижалось у поверхности до 5,8 мг/л (насыщение в среднем 60–70 % по всей акватории). Во все месяцы наблюдались различия в концентрациях кислорода между станциями. Отклонения были особенно велики на ст. 3, для которой характерен наибольший размах колебаний данного показателя. В начале периода исследования содержание кислорода на этой станции ниже ПДК, воды сильно недонасыщены кислородом, его значение опускалось до 48 %. В августе и сентябре, напротив, содержание кислорода на ст. 3 выше по сравнению с другими станциями, но с сохраняющимся недосыщением (около 70–85 %). В начале наблюдений наибольшие концентрации кислорода отмечались на ст. 2, в конце – на ст. 3.

Величина перманганатной окисляемости в пруду Шенфлиз преимущественно средняя, только в сентябре ее значения в целом по водоему приближались к повышенной (10 мгО/л) (рис. 3). По аналогии с показателями по кислороду величины перманганатной окисляемости на ст. 3 отличались от величин на других станций во второй половине исследуемого периода.

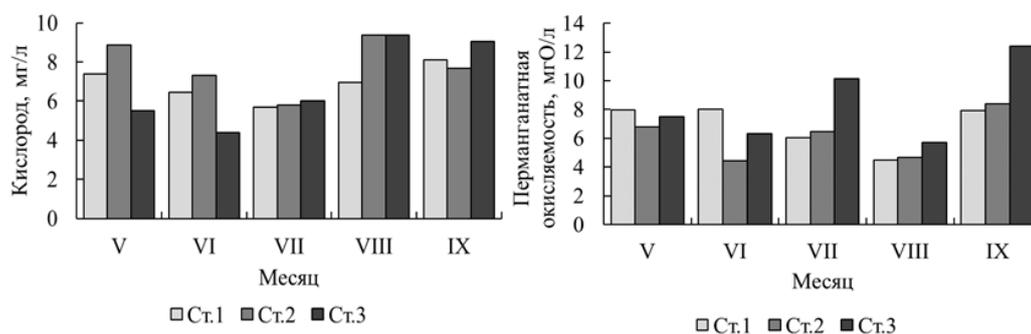


Рис. 3. Кислород (мг/л) и перманганатная окисляемость (мгО/л)
Fig. 3. Oxygen (mg/l) and permanganate value (mgO/l)

Биогенных элементов в воде обнаружено немного, их содержание находилось в пределах допустимых значений или было значительно ниже концентраций железа общего, которые обычно превышают ПДК в других городских водоемах Калининграда [13]. Фосфор фосфатов и нитриты фиксировались на уровне «следы» или вовсе не обнаруживались. Концентрации железа общего и азота аммонийного постепенно увеличивались в течение лета, а к его концу или с началом осени резко снижались (рис. 4). Различия в пространственном распределении биогенных элементов между станциями также прослеживались, но в связи с очень низкими концентрациями их колебания не учитывались.

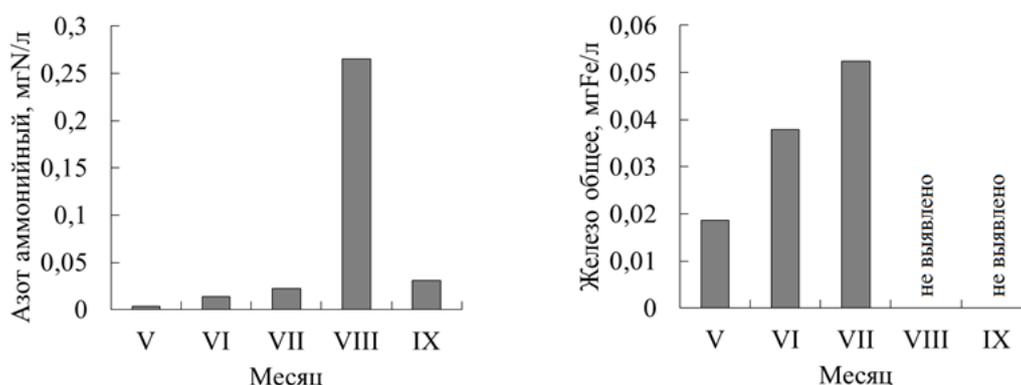


Рис. 4. Содержание азота аммонийного (мгN/л) и железа общего (мг Fe /л) (среднее на трех станциях)

Fig. 4. Ammonia nitrogen (mgN/l) and total iron (mgFe/l) (average at three stations)

По большинству показателей химических параметров, без учета растворенного кислорода, воды пруда Шенфлиз оцениваются как олигосапробные (мезотрофные), т. е. чистые. Из-за дефицита кислорода в летне-осенний период наблюдений воды пруда соответствуют категории бетамезосапробных вод (эвтрофный тип), т. е. являются слабозагрязненными.

Микробиологическая характеристика

Результаты санитарно-микробиологических исследований проб воды пруда Шенфлиз по сезонам года и станциям наблюдения представлены в табл. 1.

Таблица 1. Санитарно-микробиологические показатели качества воды пруда Шенфлиз

Table 1. Sanitary and microbiological indicators of the Schoenflies pond water quality

Наименование показателя	Станции наблюдения		
	Станция 1	Станция 2	Станция 3
Весна			
Общее микробное число воды, КОЕ/мл	$1,0 \times 10^2$	$0,8 \times 10^2$	$2,5 \times 10^2$
Бактерии группы кишечных палочек	-	+	+
Лето			
Общее микробное число воды, КОЕ/мл	$1,0 \times 10^2$	$1,1 \times 10^2$	$1,3 \times 10^2$
Бактерии группы кишечных палочек	+	+	+
Осень			
Общее микробное число воды, КОЕ/мл	$1,1 \times 10^2$	$1,4 \times 10^2$	$2,0 \times 10^2$
Бактерии группы кишечных палочек	+	+	+

Во все сезоны исследований общая бактериальная обсемененность воды была низкой, согласно ГОСТ 17.1.2.04-77 воду пруда Шенфлиз по количеству сапрофитных бактерий можно отнести к категории «чистые воды». Однако в весенний сезон на станциях 2 и 3, в летний и осенний сезоны на всех станциях

наблюдения выявляли бактерии группы кишечных палочек, указывающих на фекальное загрязнение. Развитию и сохранению кишечных бактерий способствовала температура воды (в среднем 18 °С), достаточное количество кислорода.

Состав микрофлоры воды пруда Шенфлиз на протяжении всего периода наблюдений формировался за счет аэробных и факультативно-анаэробных палочковидных и кокковых бактерий. Доля палочковидных бактерий составляла 62 % штаммов, кокковых – 38 %. Преобладание палочковидных бактерий, включающих спороносные формы, указывает на интенсивные процессы минерализации органических веществ в воде. Видовой состав микрофлоры воды пруда Шенфлиз представлен в табл. 2.

Таблица 2. Видовой состав микрофлоры воды пруда Шенфлиз
 Table 2. Species composition of the water microflora in the Schoenflies pond

Виды бактерий	Станции наблюдения		
	Станция 1	Станция 2	Станция 3
Весна			
<u>Семейство Bacillaceae</u> Bacillus subtilis	+	+	+
<u>Семейство Pseudomonadaceae</u> Pseudomonas alcaligenes Pseudomonas pseudoalcaligenes	– +	+ +	– +
<u>Семейство Aeromonadaceae</u> Aeromonas shubertii	+	–	+
<u>Семейство Enterobacteriaceae</u> Citrobacter freundii	+	+	+
<u>Семейство Micrococcaceae</u> Staphylococcus epidermidis Staphylococcus saprophyticus	– –	+ +	– –
Итого видов	4	6	4
Лето			
<u>Семейство Bacillaceae</u> Bacillus subtilis Bacillus mesentericus Bacillus megaterium	+ + +	+ + +	+ + +
<u>Семейство Pseudomonadaceae</u> Pseudomonas alcaligenes Pseudomonas pseudoalcaligenes	+ +	+ +	+ +
<u>Семейство Aeromonadaceae</u> Aeromonas shubertii	+	+	+
<u>Семейство Enterobacteriaceae</u> Citrobacter freundii	+	+	+
<u>Семейство Micrococcaceae</u> Staphylococcus saprophyticus	+	+	+
Итого видов	8	8	8
Осень			
<u>Семейство Bacillaceae</u> Bacillus subtilis Bacillus mesentericus Bacillus megaterium	+ + +	+ + +	+ – –
<u>Семейство Pseudomonadaceae</u> Pseudomonas alcaligenes	+	+	+

Виды бактерий	Станции наблюдения		
	Станция 1	Станция 2	Станция 3
<i>Pseudomonas pseudoalcaligenes</i>	–	+	–
<u>Семейство Aeromonadaceae</u>			
<i>Aeromonas shubertii</i>	+	–	+
<u>Семейство Enterobacteriaceae</u>			
<i>Citrobacter freundii</i>	+	+	+
<u>Семейство Micrococcaceae</u>			
<i>Staphylococcus epidermidis</i>	–	+	–
<i>Staphylococcus saprophyticus</i>	–	+	–
Итого видов	6	8	4

Видовой состав бактериофлоры воды пруда Шенфлиз практически не изменялся в течение сезонов года. Из палочковидных грамотрицательных бактерий в микрофлоре воды регистрировали не ферментирующих углеводы псевдомонад – *Pseudomonas alcaligenes* Monias 1928, *Ps. pseudoalcaligenes* Stanier 1966. Псевдомонады – обычные обитатели водоемов, принимают активное участие в процессах минерализации органических соединений. Грамотрицательная палочковидная микрофлора воды была также представлена ферментирующими углеводы бактериями *Aeromonas shubertii* Hickman-Brenner et al 1988 и *Citrobacter freundii* Werkman and Gillen 1932. Бактерии *A. shubertii* Hickman-Brenner et al 1988 – хемоорганотрофы, обычные обитатели воды, *C. freundii* Werkman and Gillen 1932 – представители кишечной микрофлоры, попадают в воду открытых водоемов со стоками.

Грамположительную микрофлору пруда Шенфлиз составляли споровые бактерии рода *Bacillus* и непатогенные стафилококки, данные виды микроорганизмов относятся к обычной микрофлоре воды.

Наибольшее число видов бактерий отмечали в летний и осенний сезоны. На всех станциях наблюдения в составе водной микрофлоры в течение всех сезонов выявляли санитарно-значимые кишечные бактерии *C. freundii* Werkman and Gillen 1932, споровые денитрифицирующие бактерии *B. subtilis* Cohn 1872 и аэробные *Ps. pseudoalcaligenes* Stanier 1966, не ферментирующие углеводы.

Альгологическая характеристика

Основу комплекса альгофлоры пруда формировали 75 видов и таксонов до рода отделов: зеленых – 41,3 %, диатомовых – 26,7 %. В равной степени были представлены цианобактерии, эвгленовые, стрептофитовые водоросли (8 %), другие отделы – малочисленны.

Средняя численность фитопланктона за время наблюдения варьировала в пределах 0,3–3,7 млн кл./л, биомасса – 0,5–4 мг/л. Пик развития водорослей наблюдали в сентябре, численность фитопланктона достигала более 3,7 млн кл./л, биомасса – около 4 мг/л (рис. 5), что характеризуется как начальная стадия «цветения» [14].

Основу численности в водоеме весной составляли криптофитовые водоросли (32 %), основу биомассы – диатомовые (32 %). На ст. 3 в альгофлоре отмечена роль цианобактерий (27 % от численности на станции), которые не были выявлены на других станциях. Сильных различий по численности фито-

планктона между станциями не фиксировалось, по биомассе на ст. 1 водорослей было меньше.

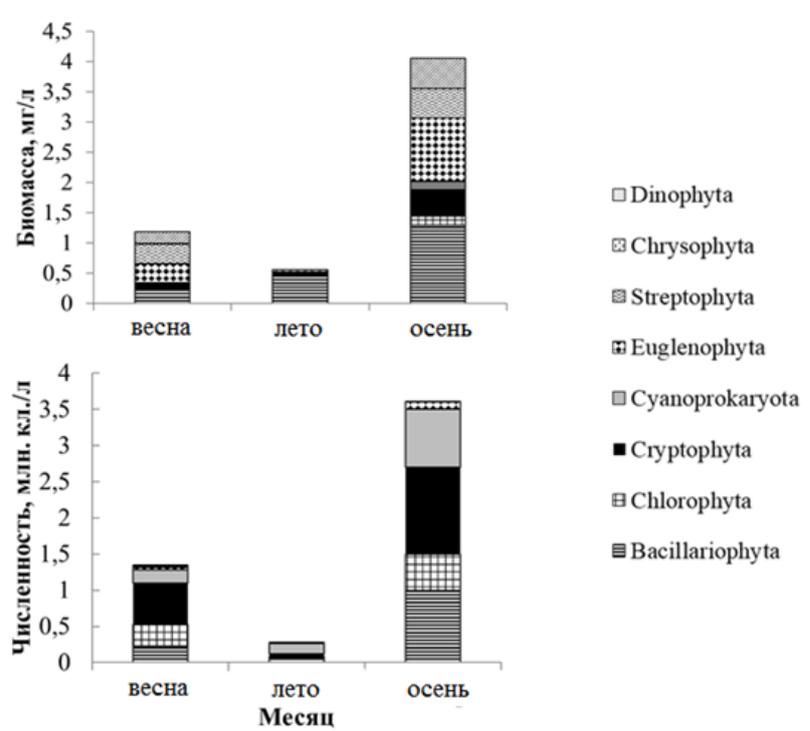


Рис. 5. Динамика общей численности и биомассы основных групп фитопланктона

Fig. 5. The dynamic of total number and biomass of the phytoplankton

Летом наблюдался спад развития фитопланктона: численность снизилась практически в семь раз, биомасса – в два раза. Основу численности занимали Cyanoprokaryota (52 %), по биомассе доминировали Bacillariophyta (83 %). Отмечены сильные различия по станциям в обоих показателях (по численности – 31–500 тыс. кл./л с увеличением от ст. 1 до ст. 3, с той же закономерностью по величине биомассы – 0,3–1,2 мг/л).

Осенью выявлен максимум численности и биомассы. Распределение видов водорослей по обеим характеристикам было более равномерным между отделами, по численности выделялись Cryptophyta (32 %), Bacillariophyta (29 %), Cyanoprokaryota (21 %), по биомассе – Bacillariophyta (32 %), Euglenophyta (26 %). Прослеживается обратная зависимость увеличения численности и биомассы от ст. 3 к ст. 1. по сравнению с летом (0,7–6,8 млн кл./л и 2,0–5,1 мг/л соответственно).

Состав водорослей в основном был сформирован β-мезосапробами (61 %). Доля водорослей, характеризующих воды с высокой степенью органического загрязнения, составила 28 %, с низкой – 11 %. Индекс сапробности по Пантле-Букку в модификации Сладечека в разные периоды в среднем менялся от 2,1 до 2,4 (табл. 4).

Таблица 3. Оценка трофности водоема по показателям фитопланктона
Table 3. Assessment of trophicity of the water body by phytoplankton indicators

Параметры	Сезон		
	весна	лето	осень
Биомасса фитопланктона, мг/л	1,19 (М)	0,56 (О)	4,05 (Э)
Численность фитопланктона, млн кл./л	1,3 (О)	0,3 (О)	3,7 (О)
Диатомовые водоросли, % от общей численности	17 (О)	26 (О)	29 (О)
Зеленые водоросли, % от общей численности	22 (О)	5 (Э)	14 (М)
Цианобактерии, % от общей численности	14 (О)	52 (О)	22 (О)
Индекс сапробности	2,2 (М)	2,4 (М)	2,1 (М)

Примечание. О – олиготрофные, М – мезотрофные, Э – эвтрофные

Согласно критериям распознавания трофности воду пруда Шенфлиза можно отнести к переходному типу трофии – от олиготрофного к мезотрофному. По индексу сапробности по Пантле и Букку воды Шенфлиза попадают в категорию бетамезосапробных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно результатам проведенных комплексных исследований воды пруда Шенфлиза относятся к категории «чистые». Результаты проведенного гидрохимического мониторинга по большинству параметров совпадают с установленными диапазонами значений для мезотрофных водоемов (по классу сапробности – олигосапробные воды). По сезонной динамике развития фитопланктона Шенфлиза можно отнести к переходному типу трофности – олиго-мезотрофному (состав водорослей в основном был сформирован β -мезосапробами). По микробиологическим показателям пруд также попадает в олиготрофный тип. По акватории пруда наблюдалось различие в пространственном распределении изучаемых параметров. Особенно выделялась ст. 3, расположенная на мелководье. Повышение температуры воздуха в летний период, быстрое прогревание воды приводили к установлению благоприятных условий для развития фито- и бактериопланктона. Пляжная зона (ст. 1) и северная часть пруда (ст. 2) с более крутым подводно-береговым склоном и большими глубинами характеризовались меньшими различиями по химическим и гидробиологическим показателям.

Полученные результаты позволяют предположить, что рекреационная нагрузка в условиях отсутствия проточности не является определяющим фактором в изменении экологического состояния пруда в летний период. Это связано с большей устойчивостью водоемов карьерного типа к внешнему воздействию по сравнению с естественными бессточными водоемами, в т. ч. благодаря большому объему воды за счет значительных глубин при небольшой площади водной поверхности. Микрофлора пруда на протяжении всех сезонов формировалась за счет аэробных бактерий, которые способствовали увеличению скорости трансформации органических веществ, особенно по окончании веге-

тационного периода. Такая картина может быть обусловлена повышенной способностью Шенфлиза к самоочищению.

Работа выполнена в рамках инициативной НИР 01-44-002.2 «Изучение экологического состояния городских прудов Калининграда».

Список источников

1. В Калининграде начали подготовку к купальному сезону. URL: https://www.klgd.ru/press/news/detail.php?ID=424200&spphrase_id=42443242 (дата обращения: 10.09.2022).
2. Цупикова Н. А., Меньшенин А. С., Алдушин А. В. Морфометрическая характеристика пруда Шенфлиз (г. Калининград) // Известия КГТУ. 2021. № 62. С. 35–49.
3. Спасение утопающих URL: https://www.klgd.ru/press/news/detail.php?ID=7071609&spphrase_id=42437052 (дата обращения: 17.10.2022).
4. Tsupikova N. A., Sevostianova E. A., Popova A. S. Influence of Water Quality in Urban Water Reservoirs of Kaliningrad on the State of Amateur Fishing // Sustainable Fisheries and Aquaculture: Challenges and Prospects for the Blue Bioeconomy: Conference proceedings. 2022. P. 73–81.
5. Характеристики загрязняющих веществ из раздела «II. Для водных объектов» «Перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды», утвержденного распоряжением Правительства Российской Федерации от 08.07.2015 г. № 1316-р. ФГБУ УралНИИ «Экология», 2016. 296 с.
6. Методы общей бактериологии / под ред. Ф. Герхардта. Москва: Мир, 1984. Т. 3. 264 с.
7. Общая и санитарная микробиология с техникой микробиологических исследований / Под ред. А. С. Лабинской, Л. П. Блинковой, А. С. Ещиной. Москва: Медицина, 2004. 576 с.
8. Определитель бактерий Берджи / под ред. Дж. Хоулта. Москва: Мир, 1997. Т. 1. 432 с.
9. Пивоваров Ю. П., Королик В. В. Санитарно-значимые микроорганизмы (таксономическая характеристика и дифференциация). Москва: ИКАР, 2000. 268 с.
10. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов / под ред. Ф. Д. Мордухай-Болтовского. Москва: Наука, 1975. 240 с.
11. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений / под ред. В. А. Абакумова. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1983. 318 с.
12. Многокритериальная оценка экологического состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей. II. Трофический статус водных экосистем / В. В. Дмитриев, Н. В. Мякишева, В. Ю. Третьяков, Н. В. Хованов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. 1997. № 1. С. 51–67.
13. Севостьянова Е. А., Цупикова Н. А., Шibaев С. В. Экологическое состояние некоторых малых водоемов Калининграда (пруды Летний и Попла-

вок) по альгологическим и гидрохимическим показателям // Материалы X Международного Балтийского морского форума: X Национальная научная конференция «Водные биоресурсы, аквакультура и экология водоемов». Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2022. С. 234–239.

14. Дмитриева О. А. Исследование закономерностей пространственно-временных изменений структурных и количественных показателей фитопланктона в различных районах Балтийского моря: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.10: Калининград, 2017. 309 с.

References

1. V Kaliningrade nachali podgotovku k kupal'nomu sezonu [Preparations for the swimming season have begun in Kaliningrad]. Available at: https://www.klgd.ru/press/news/detail.php?ID=424200&spphrase_id=42443242 (Accessed 10 September 2022).

2. Tsupikova N. A., Men'shenin A. S., Aldushin A. V. Morfometricheskaya kharakteristika pruda Shenfliz (g. Kaliningrad) [Morphometric characteristics of the Schönflies pond]. *Izvestiya KGTU*, 2021, no. 62, pp. 35–49.

3. Spasenie utopayushchikh [Rescue of the drowning]. Available at: https://www.klgd.ru/press/news/detail.php?ID=7071609&spphrase_id=42437052 (Accessed 17 October 2022).

4. Tsupikova N. A., Sevostianova E. A., Popova A. S. Influence of Water Quality in Urban Water Reservoirs of Kaliningrad on the State of Amateur Fishing. *Sustainable Fisheries and Aquaculture: Challenges and Prospects for the Blue Bioeconomy: Conference proceedings*. 2022, pp. 73–81.

5. Kharakteristiki zagryaznyayushchikh veshchestv iz razdela «II. Dlya vodnykh ob"ektov» «Perechnya zagryaznyayushchikh veshchestv, v otnoshenii kotorykh primenyayutsya mery gosudarstvennogo regulirovaniya v oblasti okhrany okruzhayushchey sredy», utverzhdennoho rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 08.07.2015 g. № 1316-r. [Characteristics of pollutants from section “II. For water bodies” “List of pollutants subject to state regulation measures in the field of environmental protection”, approved by order of the Government of the Russian Federation dated 8 July 2015 No. 1316-r]. FGBU UralNII «Ekologiya», 2016, 296 p.

6. Gerhardt F. *Metody obshchey bakteriologii* [General bacteriology methods]. Moscow, Mir Publ., 1984, vol. 3, 264 p.

7. Labinskaya A. S., Blinkova L. P., Eshchina A. S. *Obshchaya i sanitarnaya mikrobiologiya s tekhnikoy mikrobiologicheskikh issledovaniy* [General and sanitary microbiology with the technique of microbiological research]. Moscow, Meditsina, 2004, 576 p.

8. Holt J. *Opredelitel' bakteriy Berdzhii* [Berdzhi Bacteria Key]. Moscow, Mir Publ., 1997, vol. 1, 432 p.

9. Pivovarov Yu. P., Korolik V. V. *Sanitarno-znachimye mikroorganizmy (taksonomicheskaya kharakteristika i differentsiatsiya)* [Sanitary significant microorganisms (taxonomic characteristics and differentiation)]. Moscow, IKAR Publ., 2000, 268 p.

10. Mordukhay-Boltovskoy F. D. *Metodika izucheniya biogeotsenozov vnutrennikh vodoemov* [Methodology for studying biogeocenoses of inland water bodies]. Moscow, Nauka Publ., 1975, 240 p.

11. Abakumov V. A. *Rukovodstvo po metodam gidrobiologicheskogo analiza poverkhnostnykh vod i donnykh otlozheniy* [Guidance on methods for the hydrobiological analysis of surface waters and bottom sediments]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1983, 240 p.

12. Dmitriev V. V., Myakisheva N. V., Tret'yakov V. Yu., Khovanov N. V. *Mnogokriterial'naya otsenka ekologicheskogo sostoyaniya i ustoychivosti geosistem na osnove metoda svodnykh pokazateley. II. Troficheskiy status vodnykh ekosistem* [Multi-criteria assessment of the ecological state and sustainability of geosystems based on the method of summary indicators. II. Trophic status of aquatic ecosystems]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta*, Seriya 7, Geologiya, Geografiya, 1997, no. 1, pp. 51–67.

13. Sevost'yanova E. A., Tsupikova N. A., Shibaev S. V. *Ekologicheskoe sostoyanie nekotorykh malykh vodoemov Kaliningrada (prudy Letniy i Poplavok) po al'gologicheskim i gidrokhimicheskim pokazatelyam* [Ecological state of some small water bodies Kaliningrad (pond Summer and Poplavok) according to algological and hydrochemical indicators]. *Materialy X Mezhdunarodnogo Baltiyskogo morskogo foruma: X Natsional'naya nauchnaya konferentsiya «Vodnye bioresursy, akvakul'tura i ekologiya vodoemov»* [Proceedings of the X International Baltic Maritime Forum: X National Scientific Conference «Aquatic bioresources, aquaculture and ecology of water bodies»]. Kaliningrad, BGARF FGBOU VO «KGTU», 2022, pp. 234–239.

14. Dmitrieva O. A. *Issledovanie zakonomernostey prostranstvenno-vremennykh izmeneniy strukturnykh i kolichestvennykh pokazateley fitoplanktona v razlichnykh rayonakh Baltiyskogo moraya. Diss. dokt. biol. nauk* [Investigation of patterns of space-time changes in structural and quantitative indicators of phytoplankton in various areas of the Baltic Sea. Dis. dr. biol. sci.]. Kaliningrad, 2017. 309 p.

Информация об авторах

Е. А. Севостьянова – специалист по учебно-методической работе кафедры водных биоресурсов и аквакультуры

А. С. Меньшенин – специалист по учебно-методической работе кафедры водных биоресурсов и аквакультуры

О. В. Казимирченко – кандидат биологических наук, доцент кафедры водных биоресурсов и аквакультуры

Н. А. Цупикова – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры водных биоресурсов и аквакультуры

О. С. Суэтина – ведущий инженер кафедры водных биоресурсов и аквакультуры

Information about the authors

E. A. Sevostianova —specialist in educational and methodical work of the Department of Aquatic Bioresources and Aquaculture

A. S. Men'shenin – specialist in educational and methodical work of the Department of Aquatic Bioresources and Aquaculture

O. V. Kazimirchenko – PhD in Biology, Associate Professor of the Department of Aquatic Bioresources and Aquaculture

N. A. Tsupikova – PhD in Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor of the Department of Aquatic Bioresources and Aquaculture

O. S. Suetina – Lead engineer of the Department of Aquatic Bioresources and Aquaculture

Статья поступила в редакцию 12.09.2023; одобрена после рецензирования 22.09.2023; принята к публикации 02.10.2023.

The article was submitted 12.09.2023; approved after reviewing 22.09.2023; accepted for publication 02.10.2023.

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Научная статья

УДК 664.38

DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-73-83

Научное обоснование технологических параметров и рецептуры белкового наполнителя из коллагенсодержащих отходов переработки карпа

Никита Константинович Александров¹, Дмитрий Леонидович Альшевский²

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

¹nikesha98@mail.ru

²alshevsky@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-2998>

Аннотация. Отходы переработки рыбного сырья богаты белком соединительной ткани коллагеном, который при извлечении в виде гидролизата имеет высокий потенциал для использования в пищевой продукции. Одним из возможных направлений его применения является замена животного жира и частично мясного сырья. В статье рассматривается вопрос извлечения и использования коллагена для получения пищевого наполнителя твердой структуры, устойчивого к термическому воздействию. Из голов карпа обыкновенного получен гидролизат коллагена, жидкий при 20 °С. При добавлении к нему многофункциональной смеси разработаны образцы белкового наполнителя гелеобразной структуры. Определена термостабильность, органолептические и прочностные характеристики образцов в зависимости от содержания смеси. Подтверждена термостабильность наполнителя при доведении до кулинарной готовности (72 ± 2 °С) в образцах, содержащих 4 и более процента многофункциональной смеси. Показано, что при внесении смеси в гидролизат жидкой структуры (17 ± 2 °С) прочность выше, чем при добавлении в охлажденный (структуры жидкого студня с температурой 4 ± 2 °С). Зафиксировано, что хранение гидролизата в замороженном виде (минус 18 °С) в течение 30 суток с последующей дефростацией снижает прочность наполнителя на 13,5 %. Исследовано влияние сухого молока и пищевого красителя на цветовые характеристики белкового наполнителя. Показано, что внесение сухого молока делает структуру однородней и светлее. Предложено использование красителя в составе наполнителя для получения компонента пищевой промышленности, имитирующего мясную часть изделия. Таким образом, по результатам работы обоснованы технологические параметры получения белкового наполнителя из отходов переработки карпа.

Ключевые слова: гидролизат коллагена, белковый наполнитель, глубокая переработка, карп обыкновенный.

Для цитирования: Александров Н. К., Альшевский Д. Л. Научное обоснование технологических параметров и рецептуры белкового наполнителя из коллагенсодержащих отходов переработки карпа // Известия КГТУ. 2023. № 71. С. 73-83. DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-73-83

Original article

Scientific substantiation of technological parameters and recipe of protein filler from collagen-containing carp processing wastes

Nikita K. Aleksandrov¹, Dmitriy L. Al'shevskiy²

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

¹nikesha98@mail.ru

²alshevsky@kltu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-2998>

Abstract. Fish processing wastes are rich in a connective tissue protein collagen, which has a high potential in foods when extracted as a hydrolyzate. One of the possible directions of its application is replacement of animal fat and partial meat raw materials. The article deals with the problem of the extraction and further usage of this protein to obtain heat stable food filler with solid structure. Collagen hydrolyzate, liquid at 20 °C, has been obtained from the common carp heads. With adding a multifunctional mixture to it, samples of a protein filler with a gel-like structure have been developed. The heat stability, organoleptic and strength characteristics of the samples have been determined depending on the content of the mixture. The filler's heat stable when brought to culinary readiness (72 ± 2 °C) in samples containing 4 or more percent of multifunctional mixture is accepted. It is shown that the strength value is higher if mixture is added into the liquid structure hydrolyzate (17 ± 2 °C) than into a cooled (liquid jelly structure at 4 ± 2 °C). It has been recorded that storage of the hydrolyzate in frozen form (minus 18 °C) for 30 days, followed by defrosting, reduces the strength of the filler by 13.5%. The impact of the addition of milk powder and food coloring to protein filler on its color characteristics was studied. It is shown that the introduction of milk powder makes the structure more uniform and lighter. The use of food coloring in the composition of PF is proposed to obtain a component of the food industry that imitates the meat part of the product. Thus, according to the results of the work, the technological parameters for obtaining protein filler from carp processing wastes have been substantiated.

Keywords: collagen hydrolyzate, protein filler, deep processing, common carp.

For citation: Aleksandrov N. K., Alshevskiy D. L. Scientific substantiation of technological parameters and recipe of protein filler from collagen-containing carp processing wastes // *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2023;(71):73-83. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-73-83

ВВЕДЕНИЕ

Современное производство рыбной продукции характеризуется тенденцией к расширению методов глубокой переработки и переходу на безотходное производство [1]. Отходы и субпродукты разделки карпа (головы, костные ткани, кожа, чешуя и внутренние органы) составляют около 43–45 % от его массы [2, 3].

Данные части рыбы являются ценным источником соединительнотканного белка коллагена, который может быть гидролизован в виде пептидов. Полученные гидролизаты можно использовать в пищевых целях, в том числе в спортивном питании [4].

Гидролизаты коллагена из рыбного сырья, помимо пищевой направленности, имеют широкий спектр применения в различных отраслях: в косметологии (отбеливание и омолаживание кожных покровов) [5, 6]; в производстве кормов и кормовых добавок; в медицине (доставка лекарственного вещества, гемостатический эффект, защита ожоговых ран); в биотехнологии за счет антиоксидантной активности, противовоспалительного и гипогликемического действия, также используются в качестве субстрата для питательных сред [7, 8].

Гидролизат из рыбного сырья характеризуется высоким выходом и абсорбционными свойствами, малой токсичностью [9]. Тем не менее, малая студнеобразующая способность и низкая температура плавления в сравнении с получаемым гелем из субпродуктов птицы или крупного рогатого скота ограничивают варианты его применения [10, 11].

Одним из возможных направлений использований гидролизатов рыбного сырья является получение заменяющих животных жир структур в составе колбасных изделий [12]. В пищевой промышленности известно применение многофункциональных смесей, содержащих соли альгиновой кислоты, производство имитационного шпика, обеспечивающее отверждение белково-жировых эмульсий и увеличение их термостабильности [13]. Исходя из вышесказанного, актуально исследование возможности применения данных смесей с гидролизатом коллагена. Это позволит получить самостоятельный компонент (наполнитель) для добавления в продукты питания, повышающий их сенсорные характеристики и снижающий жирность.

Целью данной работы является обоснование технологических параметров и рецептуры белкового наполнителя из коллагенсодержащих отходов переработки карпа.

Для достижения цели был поставлен ряд задач:

- получить коллагеновый гидролизат из голов карпа;
- определить оптимальное количество многофункциональной альгинатной смеси (МИТПРО) в белковом наполнителе для достижения термоустойчивой твердой структуры;
- выявить влияние концентрации альгинатной смеси на прочностные характеристики наполнителя;
- изучить влияние сухого молока и пищевого красителя в составе белкового наполнителя на его цветовые свойства.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами данного исследования являются головы карпа обыкновенного, полученные из них гидролизат и образцы наполнителя.

На первом этапе исследования для отработки технологических параметров был приготовлен гидролизат коллагена из голов карпа. Последовательность его получения включает следующие технологические операции: измельчение, смешивание с водой, тепловую, а затем ферментативную обработку, инактивацию фер-

мента, удаление костей, охлаждение. Гидролиз осуществлялся с использованием отечественного ферментного препарата «Энзи-микс У» (протеолитическая активность 100 ед./г, оптимальные условия работы фермента – 40 °С и рН 4,5–6,0) [14].

Для оценки основных характеристик гидролизата коллагена определяли массовую долю влаги (п. п. 3.3.3 ГОСТ 7636), жира (п. п. 3.7.5 ГОСТ 7636), органолептические показатели (внешний вид, консистенция, цвет, запах) по общепринятым методам исследования.

На втором этапе исследования были изготовлены образцы белкового наполнителя для выявления оптимального количества МИТПРО в их составе. Наполнитель получали путем внесения МИТПРО в полученный гидролизат, перемешивания и последующего выдерживания при (4 ± 2) °С в течение часа. Получены содержащие 2, 4 и 6 % смеси образцы (1, 2, 4 соответственно). Внесение производилось в жидкий гидролизат (17 ± 2 °С). Приготовлен образец 3, в котором использовался охлажденный гидролизат (4 ± 2 °С).

Для оценки изменения свойств гидролизата в процессе хранения его выдерживали 30 сут. при минус 18 °С. На его основе был изготовлен образец наполнителя 5 с оптимальным количеством альгинатной смеси.

В полученных образцах определяли прочность на устройстве Валента (п. п. 4.4.2 ГОСТ 26185), органолептические характеристики (внешний вид, консистенция, цвет, запах) с помощью общепринятых методик. Для проверки термостойкости образцы нарезали на кусочки, равномерно распределяли в форме с рыбным фаршем, после чего доводили до кулинарной готовности (75 ± 5 °С в толще).

На третьем этапе для отработки цветowych и органолептических характеристик в образец 2 с оптимальным составом МИТПРО вносили сухое молоко с массовой долей белка 20 %, жира – 26 %, пищевой краситель с кармином и декстрозой. В рамках данного опыта получены наполнители, содержащие 2, 4, 6 % сухого молока (образцы 6, 7, 8) и краситель (образец 9).

Состав образцов наполнителя представлен в табл. 1.

Таблица 1. Состав образцов белкового наполнителя

Table 1. Compositions of protein filler samples

Компонент	Образец белкового наполнителя								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Гидролизат коллагена жидкий	98	96	–	94	96	94	92	90	96
Гидролизат коллагена охлажденный	–	–	96	–	–	–	–	–	–
Альгинатная смесь	2	4	4	6	4	4	4	4	4
Молоко сухое	–	–	–	–	–	2	4	6	–
Итого	100	100	100	100	100	100	100	100	100

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На первом этапе исследования отработаны технологические параметры гидролиза голов карпа. Технологическая схема получения гидролизата коллагена представлена на рис. 1.

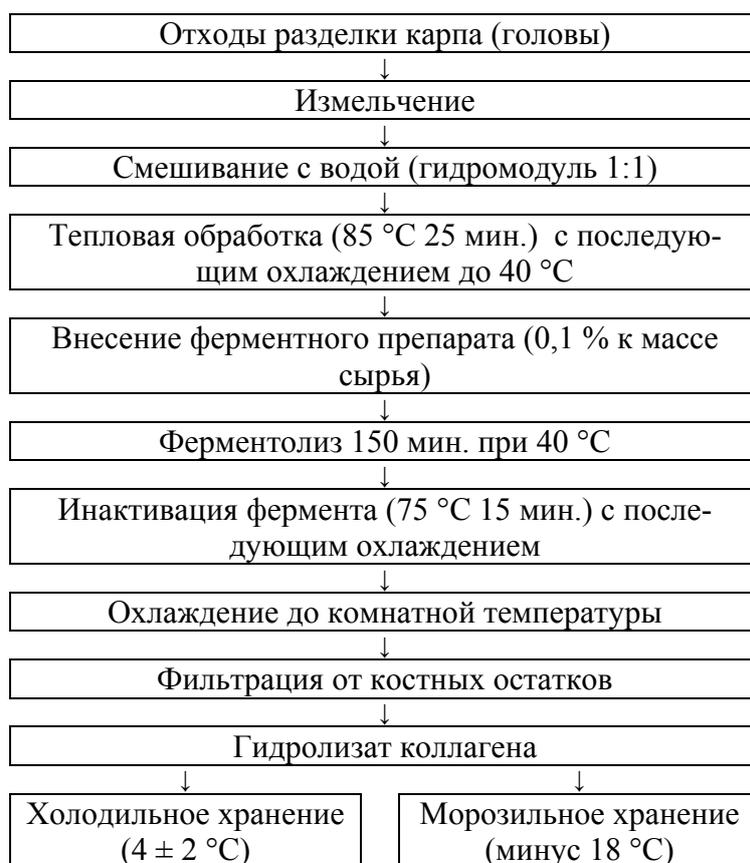


Рис. 1. Схема получения коллагенового гидролизата
Fig. 1. Scheme of obtaining collagen hydrolyzate

Выход гидролизата относительно сырья составил 106,5 %, содержание влаги – 84,4 %, жира – 1,2%. Количество белка примерно можно оценить в 14,4 %.

Описание органолептических характеристик гидролизата коллагена представлено в табл. 2.

Таблица 2. Органолептические характеристики гидролизата коллагена
Table 2. Sensory characteristics of the collagen hydrolyzate

Показатель	Описание
Внешний вид	Однородная масса с жировой пленкой на поверхности
Консистенция	Жидкая при 20 °C В охлажденном виде жидкий студень, форму не сохраняет
Цвет	Матовый, кремово-бежевый
Запах	Свойственный, выражен слабо, без постороннего запаха

Таким образом, полученный гидролизат рыбного коллагена характеризуется низкой температурой плавления (рис. 2), поэтому следующий раздел исследования посвящен вопросу увеличения данного показателя.

На втором этапе получены образцы белкового наполнителя с разным количеством альгинатной смеси. Описание их органолептических характеристик представлено в табл. 3.

Таблица 3. Органолептические характеристики белковых наполнителей с разным количеством альгинатной смеси

Table 3. Sensory characteristics of the protein filler samples with different alginate mixture mass

Показатель	Образец белкового наполнителя			
	1	2	3	4
Внешний вид	Однородная масса	Однородная масса	Однородная масса с небольшими воздушными пузырьками	Однородная масса
Консистенция	Твердая, упругая. При термической обработке (более 70 °С) форму не сохраняет	Твердая, упругая. При термической обработке (более 70 °С) форму сохраняет		
Цвет	Матовый, кремово-серый			
Запах	Свойственный, выражен слабо, без постороннего запаха			

Исходя из полученных данных, белковый наполнитель обладает твердой структурой (рис. 2). Образцы 2, 3, 4 сохранили форму в процессе тепловой обработки, т. е. внесение 4 % МИТПРО является достаточным, чтобы получить наполнитель, устойчивый к температуре.



Рис. 2. Поверхность гидролизата коллагена (слева) и белкового наполнителя (справа) в охлажденном состоянии (4 ± 2 °С)

Fig. 2. Surfaces of the chilled (4 ± 2 °С) collagen hydrolyzate (left) and protein filler (right)

Прочностные характеристики образцов представлены на рис. 3.

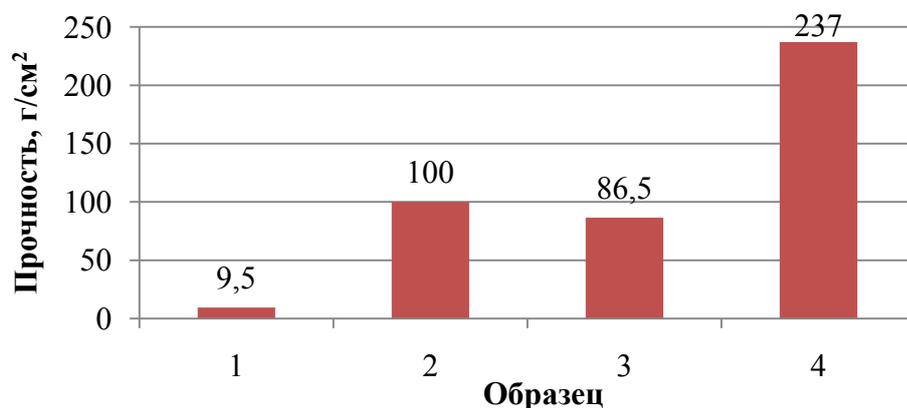


Рис. 3. Прочностные характеристики образцов наполнителя с разным количеством МИТПРО

Fig. 3. Strength properties of the fillers with different MITPRO mass

На рис. 3, видно, что с увеличением содержания МИТПРО в составе наполнителя возрастает прочность геля. Определено, что при внесении одинакового количества структурообразователя в охлажденный и жидкий гидролизат прочность первого ниже (100 г/см^2 против $86,5 \text{ г/см}^2$ в образцах 2 и 3 соответственно). Из этого следует, что эффективное распределение МИТПРО в студнеобразном гидролизате требует более длительного перемешивания и, следовательно, повышения энергозатрат.

Для оценки изменения прочностных свойств в процессе хранения гидролизат выдерживали 30 суток при минус $18 \text{ }^\circ\text{C}$, после чего он дефростировался и использовался для изготовления наполнителя (образец 5). Отмечено, что на 30-е сутки хранения в замороженном состоянии гидролизат имеет более выраженный свойственный запах без признаков порчи. Полученный из него наполнитель менее прочный, чем аналогичный из свежеприготовленного гидролизата (57 г/см^2 в сравнении со 100 г/см^2 в образце 2). Тем не менее, данный наполнитель все еще сохраняет твердую структуру и форму. Вероятно, изменение прочности связано с продолжительностью хранения, а также с рекристаллизацией влаги, сопровождающей процесс замораживания-оттаивания. Для предотвращения разрушения пептидных связей и увеличения продолжительности хранения возможно применение чешуи в составе гидролизата [15], поэтому актуально исследование, связанное с получением гидролизата смешанного состава (голова и чешуя) с последующим изучением криозащитной активности.

На третьем этапе эксперимента для улучшения цветовых характеристик наполнителя на основе оптимальной рецептуры 2 были изготовлены рецептуры наполнителей с применением сухого молока и пищевого красителя. Добавление молочного концентрата позволяет получить более однородную окраску, однако степень осветления наполнителя невелика (до светло-серого) и не дает белый или бело-кремовый цвет, имитирующий шпик. Воздействие этого компонента на прочность образцов оценивается как незначительное (изменяется менее чем на 15 %).

Образец 9 с применением пищевого красителя, содержащего кармин и декстрозу, обладал равномерным красным «мясным» оттенком (рис. 4).



Рис. 4. Белковый наполнитель с использованием пищевого красителя
Fig. 4. Protein filler with the use of a food coloring

Полученное цветовое решение визуально меняет восприятие продукта и потенциально расширяет сферу его использования в качестве имитации мясных кусочков в колбасных и иных изделиях.

Таким образом, разработаны варианты рецептур наполнителя, удовлетворяющие задачам эксперимента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана технологическая схема получения гидролизата коллагена (рис. 1), обоснованы технологические параметры для последующего получения белкового наполнителя. Наполнитель устойчив к тепловой обработке (более 70 °С) при содержании в нем многофункциональной смеси от 4 %. Представлены данные о прочностных свойствах образцов белкового наполнителя с разной долей смеси. Предложен способ применения наполнителя с добавлением красителя для имитации мясной части в колбасном изделии.

Список источников

1. Об утверждении Стратегии развития машиностроения для пищевой и перерабатывающей промышленности РФ на период до 2030 г.: Распоряжение Правительства РФ от 30 августа 2019 г. № 1931-р. URL: <http://government.ru/docs/all/123583/> (дата обращения: 25.06.2023).

2. Application of fat-containing edible fish waste for making imitation lard / D. Alshevskiy, Y. Korzhavina, M. Alshevskaya, V. Ustich // AIP Conference Proceedings. 2021. V. 2636. Iss. 1. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0103970> (дата обращения: 25.06.2023).

3. Самойлова Д. А., Цибизова М. Е. Вторичные ресурсы рыбной промышленности как источник пищевых и биологически активных добавок // Вестник АГТУ. 2015. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vtorichnye-resursy-rybnoy->

promyshlennosti-kak-istochnik-pischevyh-i-biologicheski-aktivnyh-dobavok (дата обращения: 10.07.2023).

4. Некрасова Ю. О., Мезенова О. Я., Мерзель Й. Т. Обоснование использования биопотенциала гидролизатов коллагенсодержащего рыбного сырья в протеиновом спортивном питании // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2021. № 4 (39). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-ispolzovaniya-biopotsiala-gidrolizatov-kollagensoderzhaschego-rybnogo-syrya-v-proteinovom-sportivnom-pitanii> (дата обращения: 11.07.2023).

5. Silver Carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) Scales Collagen Peptides (SCPs): Preparation, Whitening Activity Screening and Characterization / X. Zu, M. Li, G. Xiong, J. Cai, T. Liao, H. Li // Foods. 2023. V. 12. Iss. 7. URL: <https://doi.org/10.3390/foods12071552> (дата обращения: 25.06.2023).

6. Collagen Based Materials in Cosmetic Applications: a review / A. Sionkowska, K. Adamiak, K. Musiał, M. Gadomska // Materials. 2020. V. 13. Iss. 19. URL: <https://doi.org/10.3390/ma13194217> (дата обращения: 12.07.2023).

7. Antioxidant peptides derived from hydrolysates of red tilapia (*Oreochromis sp.*) scale / L. Sierra., H. Fan, J. Zapata, J. Wu // LWT. 2021. V. 146. URL: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111631> (дата обращения: 25.06.2023).

8. Use of common carp waste for pigment production by *Monascus purpureus* / J. Kolek, M. Drimi, M. Kumžák, P. Soukup, F. Szendzielarz, M. Šimera, B. Branská, P. Patáková // Kvasný průmysl. 2023. V. 69, N 1. URL: <https://doi.org/10.18832/kp2023.69.686> (дата обращения: 25.06.2023).

9. Production and Characterization of Micro-Collagen from Carp Scales Waste (*Cyprinus carpio*) / R. Zakiah Oktarlina, S. Bahri, A. Nafisah, T. Adjeng // Research Journal of Pharmacy and Technology (RJPT). 2022. V. 15. Iss. 5. URL: <https://rjptonline.org/AbstractView.aspx?PID=2022-15-5-13> (дата обращения: 25.06.2023).

10. Александров Н. К., Чернега О. П. Исследование хранимоспособности продуктов из коллагенового гидролизата // Известия КГТУ. 2022. № 64. С. 53–66.

11. Способ производства мясного хлеба: пат. 2446714 Рос. Федерация. № 2010146947/13 / Лукин А. И. [и др.]; заявл. 17.11.10; опубл. 10.04.12. Бюл. № 10. 8 с.

12. Effect of Pre-Emulsion of Pea-Grass Carp Co-Precipitation Dual Protein on the Gel Quality of Fish Sausage / X. Zhou, C. Zhang, L. Zhao, X. Zhou, W. Cao, C. Zhou // Foods. 2022. V. 11. Iss. 20. URL: <https://doi.org/10.3390/foods11203192> (дата обращения: 25.06.2023).

13. Наумов В. А., Альшевский Д. Л., Коржавина Ю. Н. Влияние технологических факторов на прочностные характеристики рыбного имитационного шпика // Известия КГТУ. 2020. № 58. С. 94–101.

14. Антипова Л. В., Горбунков М. Е. Свойства коммерческого ферментного препарата «Протеписин» // Вестник ВГУИТ. 2013. № 4 (58). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/svoystva-kommercheskogo-fermentnogo-preparata-protepsin> (дата обращения: 10.07.2023).

15. Effects and mechanism of antifreeze peptides from silver carp scales on the freeze-thaw stability of frozen surimi / X. Chen, X. Li, F. Yang, J. Wu, D. Huang, J. Huang, S. Wang // Food Chemistry. 2022. V. 396. URL: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133717> (дата обращения: 25.06.2023).

References

1. Ob utverzhdenii Strategii razvitiya mashinostroeniya dlya pishchevoy i pererabatyvayushchey promyshlennosti RF na period do 2030 g.: Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 30 avgusta 2019 g. № 1931-r. Available at: <http://government.ru/docs/all/123583/> (Accessed 25 June 2023).
2. Alshevskiy D., Korzhavina Y., Alshevskaya M., Ustich V. Application of fat-containing edible fish waste for making imitation lard. *AIP Conference Proceedings*, 2021, vol. 2636, iss. 1, available at: <https://doi.org/10.1063/5.0103970> (Accessed 25 June 2023).
3. Samoylova D. A., Tsibizova M. E. Vtorichnye resursy rybnoy promyshlennosti kak istochnik pishchevykh i biologicheskii aktivnykh dobavok [Secondary resources of the fishing industry as a source of food and biologically active additives]. *Vestnik AGTU*, 2015, no. 2, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vtorichnye-resursy-rybnoy-promyshlennosti-kak-istochnik-pischevykh-i-biologicheskii-aktivnykh-dobavok> (Accessed 10 July 2023).
4. Nekrasova Y. O., Mezenova O. Y., Merzel' Y. T. Obosnovanie ispol'zovaniya biopotentsiala gidrolizatov kollagensoderzhashchego rybnogo syr'ya v proteinovom sportivnom pitanii [Biopotential of collagen-containing hydrolysates obtained from fish raw materials for protein sports nutrition]. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya*, 2021, no. 4 (39), available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-ispolzovaniya-biopotentziala-gidrolizatov-kollagensoderzhashchego-rybnogo-syrya-v-proteinovom-sportivnom-pitanii> (Accessed 11 July 2023).
5. Zu X., Li M., Xiong G., Cai J., Liao T., Li H. Silver Carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) Scales Collagen Peptides (SCPs): Preparation, Whitening Activity Screening and Characterization. *Foods*, 2023, vol. 12, iss. 7, available at: <https://doi.org/10.3390/foods12071552> (Accessed 25 June 2023).
6. Sionkowska A., Adamiak K., Musiał K., Gadomska M. Collagen Based Materials in Cosmetic Applications: a review. *Materials*, 2020, vol. 13, iss. 19, available at: <https://doi.org/10.3390/ma13194217> (Accessed 12 July 2023).
7. Sierra L., Fan H., Zapata J., Wu J. Antioxidant peptides derived from hydrolysates of red tilapia (*Oreochromis* sp.) scale. *LWT*, 2021, vol. 146, available at: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111631> (Accessed 25 June 2023).
8. Kolek J., Drimi M., Kumžák M., Soukup P., Szendzielarz F., Šimera M., Branská B., Patáková P. Use of common carp waste for pigment production by *Monascus purpureus*. *Kvasný průmysl*, 2023, vol. 69, no. 1, available at: <https://doi.org/10.18832/kp2023.69.686> (Accessed 25 June 2023).
9. Zakiah Oktarlina R., Bahri S., Nafisah A., Adjeng T. Production and Characterization of Micro-Collagen from Carp Scales Waste (*Cyprinus carpio*). *Research Journal of Pharmacy and Technology (RJPT)*, 2022, vol. 15, iss. 5, available at: <https://rjptonline.org/AbstractView.aspx?PID=2022-15-5-13> (Accessed 25 June 2023).
10. Aleksandrov N. K., Chernega O. P. Issledovanie khranimosposobnosti produktov iz kollagenovogo gidrolizata [Study of storage stability of products made of collagen hydrolyzate]. *Izvestiya KGTU*, 2022, no. 64, pp. 53–66.

11. Lukin A. I. [i dr.]. Sposob proizvodstva myasnogo khleba [Meat loaf production method]. Patent RF, no. 2010146947/13, 2012.
12. Zhou X., Zhang C., Zhao L., Zhou X., Cao W., Zhou C. Effect of Pre-Emulsion of Pea-Grass Carp Co-Precipitation Dual Protein on the Gel Quality of Fish Sausage. *Foods*, 2022. vol. 11, iss. 20, available at: <https://doi.org/10.3390/foods11203192> (Accessed 25 June 2023).
13. Naumov V. A., Alshevskiy D. L., Korzhavina Y. N. Vliyanie tekhnologicheskikh faktorov na prochnostnyye kharakteristiki rybnogo imitatsionnogo shpika [Influence of technological factors on strength characteristics of fish imitation lard]. *Izvestiya KGTU*, 2020, no. 58, pp. 94–101.
14. Antipova L. V., Gorbunkov M. E. Svoystva kommercheskogo fermentnogo preparata "Protepsin" [Properties of the commercial enzyme preparation Protepsin]. *Vestnik VGUIT*, 2013, no. 4 (58), available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/svoystva-kommercheskogo-fermentnogo-preparata-protepsin> (Accessed 10 July 2023).
15. Chen X., Li X., Yang F., Wu J., Huang D., Huang J., Wang S. Effects and mechanism of antifreeze peptides from silver carp scales on the freeze-thaw stability of frozen surimi. *Food Chemistry*, 2022, vol. 396, available at: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133717> (Accessed 25 June 2023).

Информация об авторах

Н. К. Александров – аспирант кафедры «Технология продуктов питания»
Д. Л. Альшевский – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология продуктов питания»

Information about the authors

N. K. Aleksandrov – PhD student of the Department of Food Technology
D. L. Al'shevskiy – PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Food Technology

Статья поступила в редакцию 10.07.2023; одобрена после рецензирования 20.07.2023; принята к публикации 29.09.2023.

The article was submitted 10.07.2023; approved after reviewing 20.07.2023; accepted for publication 29.09.2023.

Научная статья
УДК 664.957.8
DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-84-101

Опыт получения пептидов с низкой молекулярной массой из различных видов вторичного рыбного сырья

Елисей Александрович Баженов¹, Лариса Степановна Байдалинова²,
Владимир Владимирович Волков³, Томас Гримм⁴

^{1,2,3}Калининградский государственный технический университет, Калининград,
Россия

⁴Биотехнологическая компания ANiMOX, Берлин, Германия

¹ya.elisey2013@yandex.ru,

²ls.baydalina@gmail.com

³vladimir.volkov@klgtu.ru

⁴t.grimm@animox.de

Аннотация. Пептиды относятся к числу важных биологически активных веществ. За последние десятилетия предприняты большие усилия ученых по разработке и получению коротких (низкомолекулярных) пептидов, которые проявляют более высокие фармакологические свойства, чем их прототипы. Источником природных пептидов с высокой биологической активностью может служить вторичное рыбное сырье – отходы, получающиеся при разделке рыбы. На рыбоперерабатывающих предприятиях Калининградской области скапливается большое количество рыбных коллагенсодержащих отходов. В статье описывается возможность получения низкомолекулярных пептидов из вторичного коллагенсодержащего рыбного сырья способами комбинированного гидролиза, сочетающими ферментативную и термическую обработку. Исследовано и использовано вторичное рыбное сырье – чешуя сардины, головы судака, хребты речного окуня и кожа лосося. Изучены процессы расщепления белка сырья под действием трех типов гидролиза в водной среде – ферментативно-термического, термическо-ферментативного и термическо-ферментативно-термического. В экспериментах использованы ферментный препарат микробиологического синтеза Alcalase® 2,4L от компании Novozymes (Дания) и экспериментальный ферментный препарат из пищеварительных органов леща, изготовленный на базе ООО «Биотех». Выявлено, что при комбинированных двух- и трехступенчатых способах гидролиза обеспечивается максимальный выход протеиновых гидролизатов с низкомолекулярными пептидами. Изучены молекулярные массы пептидов, их аминокислотный состав, установлена высокая биологическая ценность полученных протеиновых гидролизатов с низкомолекулярными пептидами. Определено наличие в гидролизатах всех незаменимых аминокислот, а также повышенное содержание пролина, глицина, аланина, глутаминовой и аспарагиновой кислот, которые необходимы для укрепления иммунитета, эргодинамики организма и работы опорно-двигательного аппарата человека.

© Баженов Е. А., Байдалинова Л. С., Волков В. В., Гримм Т., 2023

Ключевые слова: вторичное рыбное сырье, ферментативный и термический гидролиз, низкомолекулярные пептиды.

Финансирование: исследование выполнено в рамках реализации программ малых грантов Немецкого экологического фонда (DBU, Германия) в лаборатории Центра передовых технологий использования белков (ЦПТИБ) Калининградского государственного технического университета.

Для цитирования: Баженов Е. А., Байдалинова Л. С., Волков В. В., Гримм Т. Опыт получения пептидов с низкой молекулярной массой из различных видов вторичного рыбного сырья // Известия КГТУ. 2023. № 71. С. 84-101. DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-84-101

Original article

Experiments in Obtaining Low Molecular Weight Peptides from Various Types of Fish By-products

Elisey A. Bazhenov¹, Larisa S. Baydalinova², Vladimir V. Volkov³, Thomas Grimm⁴

^{1,2,3} Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

⁴ Biotech Company ANiMOX, Berlin, Germany

¹ ya.elisey2013@yandex.ru,

² ls.baydalinova@gmail.com

³ vladimir.volkov@klgtu.ru

⁴ t.grimm@animox.de

Abstract. Peptides are among the important biologically active substances. In recent decades, great efforts have been made by scientists to develop and produce short (low molecular weight) peptides that exhibit higher pharmacological properties than their prototypes. The source of natural peptides with high biological activity can serve as secondary fish raw materials – waste obtained during fish cutting. A large amount of fish collagen-containing waste accumulates at the fish processing enterprises of the Kaliningrad region. The article describes the possibility of obtaining low-molecular-weight peptides from secondary collagen-containing fish raw materials by combined hydrolysis methods combining both enzymatic and thermal treatment. Secondary fish raw materials have been studied and used- sardine scales, walleye heads, river perch ridges and salmon skin. The processes of protein splitting of raw materials under the action of three types of hydrolysis in an aqueous medium – enzymatic-thermal, thermal-enzymatic and thermal-enzymatic-thermal have been studied. In the experiments, the enzyme preparation of microbiological synthesis Alcalase® 2,4 L from Novozymes, Denmark, and an experimental enzyme preparation from the digestive organs of bream, manufactured on the basis of Biotech LLC, have been used. It has been revealed that the combined two- and three-stage hydrolysis methods provide the maximum yield of protein hydrolysates with low molecular weight peptides. The molecular weights of peptides, amino acid composition have been studied and a high biological value of the obtained protein hydrolysates with low molecular weight peptides has been established. The presence of all essential amino acids in hydrolysates has been determined, as well as an increased content of proline, glycine, alanine, glutamic and aspartic acids, which are necessary to in-

crease immunity, ergodynamics of the body and the work of the human musculoskeletal system.

Keywords: secondary fish raw materials, enzymatic and thermal hydrolysis, low molecular weight peptides.

Funding: The research was carried out within the framework of the programs of small grants of the German Environmental Foundation (DBU) Germany on the territory of "KSTU" in the laboratory "Protein Center".

For citation: Bazhenov E. A., Baydalinova L. S., Volkov V. V., Grimm T. Experience of obtaining peptides with low molecular weight from various types of secondary fish raw materials // *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2023;(71):84-101. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-84-101

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время расширяются исследования по получению из различного вторичного сырья активных пептидных композиций, являющихся биорегуляторами и биостимуляторами [1–4]. Усилия исследователей направлены на разработку коротких пептидов, проявляющих высокие фармакологические свойства, пептидных последовательностей, имеющих биологическую активность и терапевтическое значение, устойчивых к биодеградации и обладающих улучшенной биодоступностью [2]. Короткие пептиды улучшают работу иммунной системы человека, усиливая или регулируя биологические процессы, выполняют различные пластические функции, оказывают влияние на анаболические, антиоксидантные и другие биологические процессы, что обуславливает их высокую эффективность в медицине.

Важным направлением исследований является изучение и извлечение биологически активных веществ и компонентов из вторичного сырья, включая рыбное [5]. В Калининградской области на рыбообрабатывающих предприятиях ежедневно образуется большое количество рыбных отходов (голова, чешуя, хребты, пищеварительные органы). Большую часть их составляют ценные, но труднорастворимые коллагеновые белки, которые традиционными методами перевести в растворимое, биологически активное состояние не удастся. Получение из коллагенового рыбного сырья растворимых пептидов является перспективной задачей исследований и обработки [6].

Рыбные пептиды содержат много незаменимых аминокислот, которые в организме человека не синтезируются и должны поступать с пищей [2, 3, 4, 7]. Пептидные биорегуляторы из различного сырья являются объектами детальных исследований для определения возможности их использования в пищевой промышленности и фармакологии [1, 8, 9].

Коллагены рыб отличаются от коллагенов теплокровных животных тем, что имеют меньше поперечных связей между макромолекулами. У коллагенов рыб другой набор аминокислот, в том числе большое количество аспарагиновой и глутаминовой кислот. За счет этого рыбные белковые и коллагеновые гидролизаты легкоусвояемые и биологически эффективные. Активные пептиды с молекулярной массой менее 10 кДа составляют в них до 90 % массы белка [2, 7].

Низкомолекулярные пептиды из вторичного рыбного сырья могут использоваться при производстве продуктов спортивного питания [10, 11], в фармацев-

тике [2, 3], кормопроизводстве [8], в составе кормов для молоди лососей и других рыб в аквабиотехнологии [12]. Перспективным представляется получение низкомолекулярных пептидов с использованием методов гидролиза, осуществляющих комбинированное воздействие на рыбное сырье [13].

В статье описываются результаты экспериментов по получению протеиновых гидролизатов с низкомолекулярными пептидами из коллагенсодержащего вторичного рыбного сырья способами, сочетающими ферментативную и термическую обработки.

Исследовались процессы расщепления коллагенсодержащих белков с целью получения протеиновых гидролизатов, содержащих пептиды с низкой молекулярной массой, при различных способах гидролиза в водной среде – ферментативно-термическом, термическо-ферментативном и термическо-ферментативно-термическом [14, 15]. Определены химический, аминокислотный состав, биологическая ценность протеиновых гидролизатов с низкомолекулярными пептидами, молекулярные массы компонентов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для экспериментов использовано вторичное рыбное сырье (чешуя сардины (*Clupea pilchardus*, Val.), головы судака (*Sander lucioperca*), хребты окуня речного (*Perca fluviatilis*) и кожа лосося (*Salmo salar*)), предоставленное рыбоперерабатывающими предприятиями ОАО «РосКон» и ООО «Апрельское» (Калининградская обл.). На головах судака и хребтах окуня имелись значительные прирезы мышечной ткани. Химический состав сырья определяли методами, включенными в ГОСТ 7636-85. Белок выражался как сырой протеин (N·6,25).

При экспериментах сырье после измельчения на волчке с диаметром отверстий решетки 5 мм смешивали с водой в соотношении 1:1, дополнительно гомогенизировали миксером и подвергали гидролизу. Использовали три комбинированных способа гидролиза: ферментативно-термический (ФТ), термическо-ферментативный (ТФ) и термическо-ферментативно-термический (ТФТ) (табл. 1).

Таблица 1. Комбинированные способы гидролиза, использованные для получения протеиновых гидролизатов

Table 1. Combined methods for producing protein hydrolysates

Номера проб	Используемое сырье	Параметры технологического процесса
1*	Чешуя сардины	ФТ – ферментативный гидролиз при 50 °С (6 ч) и термический гидролиз при 130 °С (30 мин)
2*	Чешуя сардины	ТФ – термический гидролиз при 130 °С (1) ч и ферментативный гидролиз при 50 °С (6 ч)
3*	Чешуя сардины	ТФТ – термический гидролиз при 130 °С (1 ч), ферментативный гидролиз при 50 °С (4 ч) и термический гидролиз при 130 °С (30 мин)
4*	Головы судака	ФТ – ферментативный гидролиз при 50 °С (6 ч) и термический гидролиз при 130 °С (40 мин)

5*	Головы судака	ФТ – ферментативный гидролиз при 50 °С (6 ч) и термический гидролиз при 130 °С (30 мин)
5(1)**	Головы судака	ФТ – ферментативный гидролиз (с применением ферментного препарата из пищеварительных органов леща) при 50 °С (3 ч) и термический гидролиз при 130 °С (30 мин)
6*	Головы судака	ТФТ – термический гидролиз при 130 °С (1 ч), ферментативный гидролиз при 50 °С (4 ч) и термический гидролиз при 130 °С (30 мин)
7*	Хребты окуня	ФТ – ферментативный гидролиз при 50 °С (6 ч) и термический гидролиз при 130 °С (30 мин)
8*	Кожа лосося соленая	ФТ – ферментативный гидролиз при 50 °С (3 ч) и термический гидролиз при 130 °С (30 мин)
8(1)**	Кожа лосося соленая	ФТ – ферментативный гидролиз (с применением ферментного препарата из пищеварительных органов леща) при 50 °С (3 ч) и термический гидролиз при 130 °С (30 мин)

Обозначения: *при ферментативном гидролизе использован фермент Alcalase® 2,4 L; **при ферментативном гидролизе использован ферментный препарат из пищеварительных органов леща

Для осуществления ферментативной части гидролиза (Ф-гидролиза) к подготовленному материалу добавляли ферментный бактериальный препарат Alcalase® 2,4 L (Novozymes, Дания) или ферментный препарат из пищеварительных органов леща (изготовлен в ООО «Биотех»). Ферментативный гидролиз при температуре 50 °С с препаратом Alcalase® 2,4 L продолжался 6 ч, с ферментным препаратом из пищеварительных органов леща – 3 ч. Дозировка препарата Alcalase® 2,4 L составляла 0,5 % к массе сырья, а препарата из пищеварительных органов леща – 5 %.

Термические стадии гидролиза проводили в автоклаве аппарата РТ-5 (Россия), где пробы выдерживали при температуре 130 °С, давлении 0,25 МПа в течение 30, 40 и 60 мин при перемешивании.

При термическо-ферментативном процессе ферментные препараты вносили после завершения термической стадии и охлаждения смеси до 50 °С.

По завершении процессов гидролиза смеси разделяли центрифугированием при скорости вращения ротора центрифуги 3500 об./мин на три фракции: жировую (верхний слой), протеиновую (водно-белковую, средний слой) и минерально-протеиновую (осадочную, нижний слой). Жировую фракцию отделяли от водно-белковой после отстаивания в делительной воронке. Водорастворимые фракции (протеиновые гидролизаты) высушивали на лабораторной установке сублимационной сушки CHRIST Alpha 1-2 LDplus (Германия) с температурой в конденсоре минус 60 °С и температурой сублимации и сушки от минус 25 до 35 °С.

Фракционный состав протеинов в гидролизатах исследовали методом гельпроникающей хроматографии на аппаратуре Phenomenex (Yarra 3uSEC-2000, США). Сущность метода заключается в разделении протеиновой пробы колоночной гельпроникающей хроматографией (носитель Sephadex G 75 Superfine) и идентификации молекулярных масс фракций ультрафиолетовым детектором

UV-Detektor при длине волны 214 нм. Фиксировали время выхода при элюировании молекул с различными молекулярными массами и с использованием молекулярного стандарта (протеинов с известными молекулярными массами) рассчитывали молекулярные массы протеиновых фракций.

Аминокислотный (АК) состав сублимированных протеиновых гидролизатов определяли в лаборатории Атлантического филиала ВНИРО («АтлантНИРО») методом капиллярного электрофореза с использованием системы КЭ «КАПЕЛЬ®-105М» ГК «ЛЮМЭКС», Россия.

Сбалансированность АК-состава определяли по показателям «аминокислотный скор» (АКС) относительно «идеального» белка и «коэффициент различия аминокислотных скоров» (КРАС) [6]. Для оценки биологической ценности белков рассчитывали показатели их аминокислотной сбалансированности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Общий химический состав вторичного рыбного сырья – чешуи сардины, голов судака, хребтов речного окуня и кожи лосося (соленой) – представлен в табл. 2.

Таблица 2. Общий химический состав вторичного рыбного сырья
Table 2. Total chemical composition of secondary fish raw materials

Сырье	Содержание, г/100 г			
	влаги	жира	белка (сырого протеина, N·6,25)	минеральных веществ (золы)
Чешуя сардины	63,8±0,3	0,4±0,1	16,7±0,6	19,1±0,4
Головы судака	67,8±0,6	1,6±0,1	21,4±0,5	9,2±0,5
Хребты окуня	79,0±0,5	0,9±0,1	18,5±0,5	1,6±0,5
Кожа лосося (соленая)	56,0±0,3	23,2±0,6	15,2±0,3	5,6±0,3

Как видим, наибольшее количество сухих веществ находится в чешуе сардины и коже лосося (соленой). Высокое содержание белка определено в головах судака и хребтах окуня, на которых имелись прирезы мышечной ткани. В коже лосося (соленой) много жира (23,2±0,6 %).

Выходы жировой, сублимированных протеиновой и минерально-протеиновой фракций при гидролизе тремя различными способами оценивались в процентах по отношению к содержанию сухих веществ в сырье (табл. 3).

Данные, представленные в табл. 3, показывают, что гидролиз ФТ с использованием фермента Alcalase® 2,4 L дает максимальные выходы протеиновой фракции из голов судака (проба 5) по сравнению с другим сырьем. Увеличение продолжительности термической обработки до 40 мин при рН 9,5 жидкой среды (проба 4) не обеспечило повышения выхода протеиновой фракции. Наибольший выход протеиновой фракции получается при обработке чешуи сардины при ФТ-гидролизе. Выход протеинов из кожи лосося при ФТ-гидролизе составил более 80 % от сухих веществ сырья.

Таблица 3. Выход протеиновой, жировой и минерально-протеиновой фракций при комбинированных гидролизах вторичного рыбного сырья

Table 3. The yield of protein, fat and mineral- protein fractions from secondary fish

Номера проб	Сырье	Тип гидролиза	Выход сухих фракций, % от сухих веществ сырья		
			протеиновой	жировой	минерально-протеиновой
1	Чешуя сардины	ФТ*	12,2	–	8,2
2	Чешуя сардины	ТФ*	14,9	–	9,1
3	Чешуя сардины	ТФТ*	15,6	–	5,1
4	Головы судака	ФТ* при рН 9,5	10,2	1,8	10,3
5	Головы судака	ФТ*	22,8	2,5	3,5
5(1)	Головы судака	ФТ **	21,6	2,0	5,2
6	Головы судака	ТФТ*	12,5	1,7	12,1
7	Хребты окуня	ФТ*	18,5	1,9	8,8
8	Кожа лосося (соленая)	ФТ*	82,3	14,1	4,0
8(1)	Кожа лосося (соленая)	ФТ**	84,2	13,2	3,1

Обозначения: *при ферментативном гидролизе использован фермент Alcalase® 2,4 L; **при ферментативном гидролизе использован ферментный препарат из пищеварительных органов леща

Хорошие результаты при ФТ-гидролизе вторичного рыбного сырья показал ферментный препарат из пищеварительных органов леща. Так, в пробе 5(1) выход гидролизата всего на 5,3 % ниже по сравнению с пробой, полученной с ферментом Alcalase® 2,4 L (проба 5), а при ФТ-обработке кожи лосося с ферментом из пищеварительных органов леща (проба 8(1)) выход протеиновой фракции даже на 2,3 % выше по сравнению с пробой с Alcalase® 2,4 L (проба 8).

Важной характеристикой сухих гидролизатов является растворимость. Содержание в сублимированных гидролизатах сухих веществ, протеинов, растворимость протеинов в воде представлены в табл. 4.

Таблица 4. Содержание сухих веществ, протеинов и растворимость в воде сухих протеиновых гидролизатов, полученных из чешуи сардины, голов судака, хребтов окуня и кожи лосося

Table 4. Dry matter content, proteins and solubility in water of dry protein hydrolysates obtained from sardine scales, zander heads, perch spines and salmon skin

Номера образцов	Содержание сухих веществ (г/100 г)	Содержание золы (г/100 г)	Белок (сырой протеин, N·6,25)			Растворимость протеинов, %
			Общий (г/100 г)	% от сухих веществ	растворимый (г/100 г)	
1*	91,13	1,60	79,50	87,23	79,42	99,9
2*	89,95	4,74	75,66	84,11	75,54	99,85
3**	94,33	1,97	82,00	86,92	81,75	99,7
4	93,53	3,68	79,78	85,30	79,31	99,42
5*	92,72	5,83	77,15	83,20	74,63	96,74
5(1)**	93,97	4,95	78,12	84,15	75,22	97,34
6*	92,38	4,09	78,46	84,93	78,33	99,84
7*	92,39	4,33	78,19	84,63	75,07	96,02
8	91,52	8,23	77,16	84,31	76,70	99,40
8(1)**	92,43	9,21	78,02	85,03	77,54	99,89

Обозначения: *при ферментативном гидролизе использован фермент Alcalase® 2,4 L; **при ферментативном гидролизе использован ферментный препарат из пищеварительных органов леща

По результатам, представленным в табл. 4, можно заключить, что все сухие гидролизаты содержат значительное количество протеинов – 75,66–82,00 %, что составляет 83,20–87,23 % от количества их сухих веществ. Все образцы хорошо растворимы в воде (растворимость не ниже 96,02 %).

Для оценки биологической ценности протеиновых гидролизатов исследовался их аминокислотный состав. Известно, что коллагеновый белок характеризуется высоким содержанием глицина и низким содержанием цистеина и триптофана. Содержание остатков пролина и гидроксипролина может превышать 20 % массы белка [9]. В табл. 5 и 6 представлены аминокислотные (АК) составы сухих (сублимированных) протеиновых гидролизатов.

Таблица 5. Аминокислотный состав сухих протеиновых гидролизатов из чешуи сардины, голов судака, хребтов окуня и кожи лосося, мг/г белка
 Table 5. Amino acid composition of dry protein hydrolysates from sardine scales, pike-perch heads, perch spines and salmon skin, mg/g protein

Аминокислоты (АК)	Обозначения аминокислот	Номера проб и способы гидролиза					
		1 (ФТ*)	3 (ТФТ*)	5 (ФТ*)	6 (ТФТ*)	7 (ФТ*)	8 (ФТ*)
Аргинин	Arg	70,06	75,36	54,31	53,70	44,12	71,52
Лизин	Lys	54,21	50,98	51,88	50,51	51,41	45,43
Тирозин	Tyr	15,09	13,17	20,74	18,75	13,42	13,93
Фенилаланин	Phe	25,53	24,76	28,39	26,91	26,60	21,36
Гистидин	His	14,71	14,14	14,00	15,94	13,81	14,46
Лейцин + Изолейцин	Leu Ile	52,58	50,00	69,47	73,65	68,81	46,78
Метионин	Met	26,29	27,80	22,29	23,60	19,31	20,69
Валин	Val	51,70	15,85	22,42	13,26	20,21	11,09
Пролин	Pro	114,84	111,95	52,88	67,47	42,33	84,77
Треонин	Thr	29,81	30,49	31,23	33,04	29,29	26,09
Серин	Ser	39,75	41,58	38,36	46,17	34,02	44,48
Аланин	Ala	105,55	103,78	60,66	74,49	54,61	72,47
Глицин	Gly	214,97	219,00	86,49	115,81	74,56	172,52
Цистин + цистеин	Cys·Cys	1,26	1,21	4,02	1,27	3,84	1,35
Аспарагиновая кислота + аспарагин	Asp·Asn	70,44	78,78	78,03	84,44	68,17	72,47
Глутаминовая кислота + глутамин	Glu·Glu	105,53	128,66	107,3	123,63	91,06	97,75

Обозначения: *при ферментативном гидролизе использован фермент Alcalase® 2,4 L

Сухие протеиновые гидролизаты из коллагенсодержащего вторичного рыбного сырья, полученные при ФТ-, ТФ- и ТФТ-способах гидролиза, содержат все незаменимые аминокислоты (триптофан не показан, так как он разрушается при кислотном гидролизе в процессе подготовки проб к анализу). Из заменимых аминокислот преобладающими (в мг/г белка) являются глицин (74,56–219,00), аланин (54,61–108,50), глутаминовая кислота + глутамин (91,06–129,66) и пролин (42,33–114,84), что согласуется с литературными данными [2, 11]. Именно эти АК необходимы для активной физической деятельности человека, работы опорно-

двигательного аппарата. Наибольшее количество пролина, аланина и глицина содержится в протеиновых гидролизатах из чешуи сардины.

Следует отметить, что глицин-аланин-глициновая последовательность аминокислотных повторов, встречающаяся только в коллагене чешуи рыб, обеспечивает высокий антиоксидантный и антигипертензивный эффекты [2, 7, 10].

Биологическую ценность белков гидролизатов оценивали по аминокислотному скору (АКС, %) незаменимых аминокислот относительно «идеального» белка – стандартной шкалы ФАО/ВОЗ, а избыток незаменимых аминокислот – по коэффициенту различия аминокислотных скоров (КРАС, %), определяли также биологическую ценность (БЦ, %). Сбалансированность аминокислотного состава учитывали по коэффициенту R_c (доли единицы) [6]. Значения этих характеристик представлены в табл. 6.

Таблица 6. Скоры незаменимых аминокислот протеинов в гидролизатах из вторичного рыбного сырья – чешуи сардины, голов судака, хребтов окуня и кожи лосося, полученных комбинированными способами, в %

Table 6. Scores of essential amino acids of proteins in hydrolysates from secondary fish raw materials – sardine scales, walleye heads, perch ridges and salmon skin, obtained by combined methods, in %

Незаменимые аминокислоты	Содержание аминокислот в идеальном белке, мг/г	Аминокислотные скоры (АКС, %) незаменимых аминокислот, экспериментальные образцы и способы гидролиза					
		1 – чешуя сардины (ФТ*)	3 – чешуя сардины (ТФТ*)	5 – головы судака (ФТ*)	6 – головы судака (ТФТ*)	7 – хребты окуня (ФТ*)	8 – кожа лосося (ФТ*)
Лизин	55	98,78	92,7	94,3	91,8	93,5	93,9
Гистидин	15	98,33	94,30	93,3	106,3	92,1	96,7
Треонин	40	74,7	76,2	78,1	82,6	73,2	74,1
Цистин + метионин	35	75,3	79,4	63,7	67,4	55,2	67,2
Валин	50	103,62	31,7	44,8	35,7	40,4	25,2
Изолейцин + лейцин	110	47,90	45,4	63,2	55,8	63,2	48,3
Тирозин + фенилаланин	60	67,87	63,2	81,9	76,1	81,9	66,8
Коэффициенты различия аминокислотных скоров (КРАС), %		28,9	32,6	25,7	33,2	27,1	27,0

Биологическая ценность (БЦ), %	71,1	67,4	74,3	66,8	72,9	73,0
Коэффициенты рациональности аминокислотного состава R_c	0,59	0,52	0,65	0,50	0,63	0,63

Обозначения: *при ферментативном гидролизе использован фермент Alcalase® 2,4 L

Протеиновые смеси из вторичного рыбного сырья отличаются достаточным содержанием незаменимых аминокислот. Все образцы имеют высокие значения скоров для этих аминокислот (от 60 % до 99 %), однако скоры для изолейцина и лейцина не превышают 63,2 %. В протеинах из чешуи сардины больше незаменимых аминокислот по сравнению с протеинами, полученными из голов судака и хребтов окуня. Аминокислотные скоры протеиновых фракций из голов судака несколько ниже (за исключением сора гистидина в образце, полученном ТФТ-гидролизом), чем у гидролизатов, полученных из другого сырья.

Представленные в табл. 6 значения коэффициентов БЦ указывают на высокую биологическую ценность протеиновых гидролизатов (66,8–74,3 %). Однако для некоторых незаменимых аминокислот аминокислотные скоры были достаточно низкими (у валина скоры 25,2–44,8 %), что отражается в коэффициентах рациональности аминокислотного состава (0,50–0,65). Полученные данные указывают на необходимость добавления дополнительных источников незаменимых аминокислот (в частности, валина) при изготовлении пищевых композиций с использованием пептидсодержащих протеиновых гидролизатов для обеспечения сбалансированности питания.

Для решения главной задачи исследования – получения из вторичного рыбного сырья гидролизатов с низкомолекулярными пептидами – необходимо было оценить молекулярные массы продуктов из различного сырья при комбинированных способах гидролиза. Результаты оценок молекулярно-массового состава протеиновых гидролизатов представлены на рис. 1–7.



Рис. 1. Диаграмма молекулярных масс протеинового гидролизата пробы 2 (чешуя сардины), полученного методом ТФ-гидролиза, фермент Alcalase® 2,4 L

Fig. 1. Diagram of molecular weights of protein hydrolysate of sample 2 (sardine scales) obtained by TF-hydrolysis, enzyme Alcalase® 2,4 L

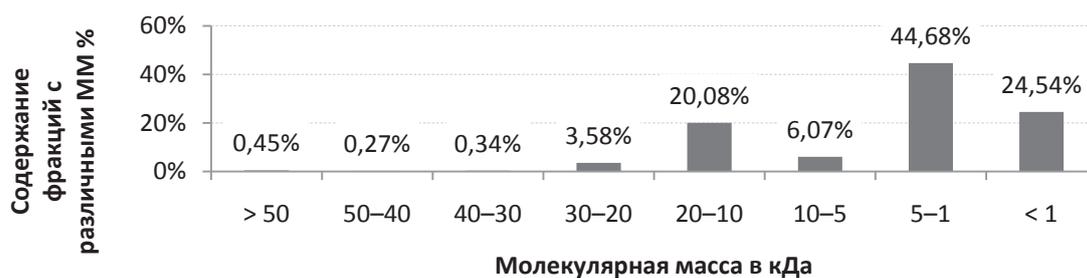


Рис. 2. Диаграмма молекулярных масс протеинового гидролизата пробы 3 (чешуя сардины), полученного методом ТФТ-гидролиза, фермент Alcalase® 2,4 L
Fig. 2. Diagram of molecular weights of protein hydrolysate in sample 3 (sardine scales) obtained by TFT-hydrolysis, enzyme Alcalase® 2,4 L



Рис. 3. Диаграмма молекулярных масс протеинового гидролизата пробы 5 (головы судака), полученного методом ФТ-гидролиза, фермент Alcalase® 2,4 L
Fig. 3. Diagram of molecular weights of protein hydrolysate in sample 5 (zander head) obtained by FT-hydrolysis, enzyme Alcalase® 2,4 L

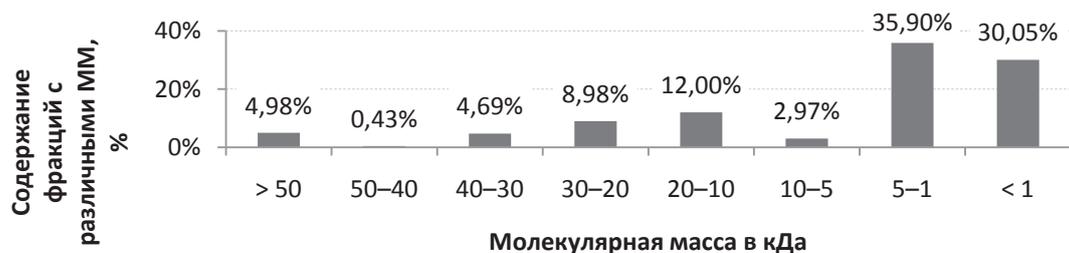


Рис. 4. Диаграмма молекулярных масс протеинового гидролизата пробы 5(1) (головы судака), полученного методом ФТ-гидролиза с использованием ферментного препарата из пищеварительных органов леща
Fig. 4. Diagram of molecular weights of protein hydrolysate in sample 5(1) (pikeperch heads) obtained by FT-hydrolysis obtained by FT hydrolysis using an enzyme preparation from the digestive organs of bream



Рис. 5. Диаграмма молекулярных масс протеинового гидролизата пробы 7 (хребты окуня), полученного методом ФТ-гидролиза, фермент Alcalase® 2,4 L
Fig. 5. Diagram of molecular weights of protein hydrolysate in sample 7 (perch spines) obtained by FT-hydrolysis, enzyme Alcalase® 2,4 L

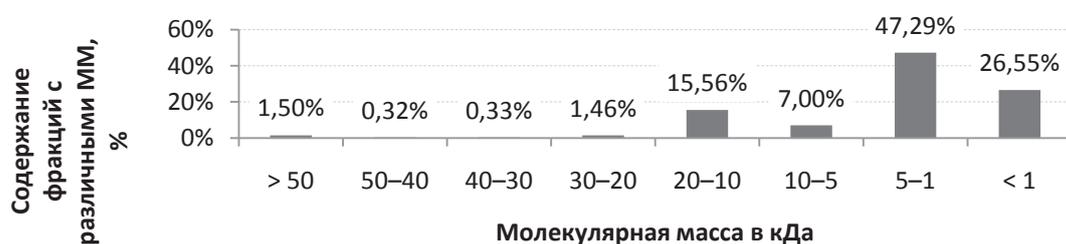


Рис. 6. Диаграмма молекулярных масс протеинового гидролизата пробы 8 (кожа лосося), полученного методом ФТ-гидролиза, фермент Alcalase® 2,4 L
Fig. 6. Diagram of molecular weights of protein hydrolysate in sample 8 (salmon skin), obtained by FT-hydrolysis, obtained by FT hydrolysis, enzyme Alcalase® 2,4 L



Рис. 7. Диаграмма молекулярных масс протеинового гидролизата пробы 8(1) (кожа лосося), полученного методом ФТ-гидролиза с использованием ферментного препарата из пищеварительных органов леща
Fig. 7. Diagram of molecular weights of protein hydrolysate in sample 8(1) (salmon skin) obtained by FT-hydrolysis, using an enzyme preparation from the digestive organs of bream

Результаты показывают, что у пептидов протеиновых гидролизатов из различного сырья молекулярно-массовое распределение различается в зависимости от вида используемого сырья и методов гидролиза. Но во всех образцах низкомолекулярные фракции (ММ менее 10 кДа) составляют от 75,29 до 80,84 % общей массы протеинов в гидролизате. Преобладают в этих фракциях пептиды с ММ

5–1 кДа, количество которых изменяется от 35,90 до 47,29 % от всех белков или от 49,04 до 61,39 % от масс фракций с ММ < 10 кДа.

На рис. 6 и 7 видно, что при ФТ-гидролизе кожи лосося соленой получается наибольшее количество пептидов с ММ 5–1 кДа (47,29 %). При ТФТ-гидролизе чешуи сардины (рис. 2) образуется меньшее количество пептидов (44,6 %) по сравнению с ФТ- и ТФ- способами. ФТ-гидролиз голов судака и хребтов окуня дает еще меньшие количества – 35–38 % (рис. 4, 5). При использовании фермента из пищеварительных органов леща (рис. 4) для обработки голов судака с примененной концентрацией выход пептидов с ММ 5–1 кДа и ММ < 1 кДа несколько ниже по сравнению с пробой, полученной с ферментом Alcalase® 2,4L.

Таким образом, эксперименты показали возможность получения протеиновых гидролизатов с активными низкомолекулярными пептидами из разнообразного по химическому составу и свойствам вторичного рыбного сырья – чешуи сардины, голов судака, хребтов речного окуня и кожи лосося. При испытанных способах гидролиза получают протеиновые гидролизаты с пептидными комплексами с ММ < 10 кДа, которые содержат все незаменимые аминокислоты и обладают высокой биологической ценностью. Для ферментативного гидролиза можно использовать бактериальный фермент Alcalase® 2,4 L и другие протеолитические ферменты, например, ферментные препараты из пищеварительных органов рыб.

ВЫВОДЫ

Изучены процессы расщепления белков вторичного рыбного сырья (чешуя сардины, головы судака, хребты речного окуня, кожа лосося) для получения протеиновых гидролизатов с низкой молекулярной массой пептидов при ферментативно-термическом, термическо-ферментативном и термическо-ферментативно-термическом способах гидролиза в водной среде.

Полученные результаты свидетельствуют о высоком биопотенциале коллагенсодержащего вторичного рыбного сырья и рациональности производства из него протеиновых гидролизатов. Испытанные способы гидролиза позволяют получать протеиновые гидролизаты с высокими концентрациями низкомолекулярных пептидов со сбалансированным аминокислотным составом.

Содержание фракций с ММ < 10 кДа составляет от 68,92 до 80,84 % общего количества протеинов гидролизатов. Во всех образцах во фракциях с ММ < 10 кДа преобладающими являются пептиды с ММ 5–1 кДа, составляющие в них от 49,04 до 61,39 %.

Протеиновые гидролизаты имеют сбалансированный аминокислотный состав, содержат все незаменимые и ценные заменимые аминокислоты с высокой биологической активностью, такие как пролин, глицин, аланин, глутаминовая и аспарагиновая кислоты. Выходы гидролизатов и их аминокислотный состав колеблются в зависимости от вида используемого сырья и способа гидролиза. Наиболее эффективными для получения протеиновых гидролизатов с увеличенным содержанием низкомолекулярных пептидов являются ТФТ- и ТФ-гидролизы.

Виды используемых ферментных препаратов также влияют на выходы и состав пептидных композиций. Использование для гидролиза сырья природного ферментного препарата из пищеварительных органов рыб (леща) позволяет получать низкомолекулярные пептиды, количество которых лишь несколько ниже по

сравнению с процессом, в котором используется ферментный препарат микробиологического синтеза Alcalase® 2,4 L.

Список источников

1. Морозов В. Г., Хавинсон В. Х. Пептидные биорегуляторы (25-летний опыт экспериментального и клинического изучения). Санкт-Петербург: Наука. 1996. 74 с.
2. Беседнова Н. Н., Эпштейн Л. М. Иммуноактивные пептиды из гидробионтов и наземных животных: монография. Владивосток: ТИНРО-центр. 2004. 248 с.
3. Kristinsson H. G., Rasco B. A. Fish Protein Hydrolysates: Production, Biochemical, and Functional Properties // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2000. V. 40. N. 1. P. 43–81. DOI: 10.1080/10408690091189266.
4. Vercruyse L., Van Camp J., Smaghe G. ACE inhibitory peptides derived from enzymatic hydrolysates of animal muscle protein: a review // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2005. V. 53 N. 21. P. 8106–8115. DOI: 10.12691/jfmr-1-6-5.
5. Мезенова О. Я. Перспективы получения и использования протеинов вторичного рыбного сырья // Вестник Международной академии холода. 2018. № 1. С. 5–10.
6. Воробьев В. И. Использование рыбного коллагена и продуктов его гидролиза // Известия КГТУ. 2008. № 13. С. 55–58.
7. Marine Proteins and Peptides. Biological activities and applications / edited by S. K. Kim. John Wiley and Sons. 2013. 785 p.
8. Биоактивные белки и пептиды: современное состояние и новые тенденции практического применения в пищевой промышленности и кормопроизводстве / Д. В. Гришин, О. В. Подобед, Ю. А. Гладилина, М. В. Покровская, Н. Н. Соколов // Вопросы онкологии. 2017. Т. 63. № 3. С. 497–505.
9. Антипова Л. В., Глотова И. А. Использование вторичного коллагенсодержащего сырья мясной промышленности. Санкт-Петербург: ГИОРД. 2006. 384 с.
10. Протеины из вторичного рыбного сырья как инновационные компоненты спортивного питания / А. Хелинг, Т. Гримм, В. В. Волков, Н. Ю. Мезенова // Известия КГТУ. 2015. № 39. С. 85–94.
11. Романенко Н. Ю., Мезенова О. Я., Некрасова Ю. О. Современные продукты спортивного питания // Вестник МГТУ. 2021. Т. 24. № 4. С. 414–427.
12. Оценка биопотенциала вторичного крабового сырья и продуктов его гидролиза для использования в аквабиотехнологии / О. Я. Мезенова, С. Н. Максимова, С. В. Агафонова, Н. Ю. Романенко, Н. С. Калинина, В. В. Волков, Й. Т. Мёрзель // Вестник МАХ. 2023. № 3. С. 44–52.

13. Исследования различных способов гидролитического процесса вторичного рыбного сырья консервного производства / А. Хелинг, Т. Гримм, В. В. Волков, Н. Ю. Мезенова // Вестник Международной академии холода. 2016. № 1. С. 3–8. DOI: 10.21047/1606-4313-2016-16-1-3-8.

14. Сравнительная оценка способов гидролиза коллагенсодержащего сырья при получении пептидов и исследовании их аминокислотной сбалансированности / О. Я. Мезенова, В. В. Волков, Й. Т. Мёрзель, Т. Гримм, С. Кюн, А. Хелинг, Н. Ю. Мезенова // Известия ВУЗов. Прикладная химия и биотехнология. 2018. Т. 8. № 4. С. 83–94.

15. Способ получения пищевых добавок из вторичного рыбного сырья с применением гидролиза: пат. Рос. Федерация. № 2681352 С1 / Агафонова С. В., Байдалинова Л. С., Волков В. В., Городниченко Л. В., Гримм Т., Мезенова Н. Ю., Мезенова О. Я., Хелинг А.; заявл. 31.01.2018; опубл. 06.03.2019. Бюл. № 7.

References

1. Morozov V. G., Khavinson V. Kh. *Peptidnye bioregulatory (25-letniy opyt eksperimental'nogo i klinicheskogo izucheniya)* [Peptide bioregulators (25-year experience of experimental and clinical study)]. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 1996, 74 p.

2. Besednova N. N., Epshtein L. M. *Immunoaktivnye peptidy iz gidrobiontov i nazemnykh zhivotnykh* [Immunoactive peptides from hydrobionts and terrestrial animals]. Vladivostok, TINRO-tsentr, 2004, 248 p.

3. Kristinsson H. G., Rasco B. A. Fish Protein Hydrolysates: Production, Biochemical, and Functional Properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2000, vol. 40, no. 1, pp. 43-81. DOI: 10.1080/10408690091189266.

4. Vercruyse L., Van Camp J., Smagghe G. ACE inhibitory peptides derived from enzymatic hydrolysates of animal muscle protein: a review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, vol. 53, no. 21, pp. 8106–8115. DOI: 10.12691/jfnr-1-6-5.

5. Mezenova O. Ya. Perspektivy polucheniya i ispol'zovaniya proteinov vtorichnogo rybnogo syr'ya [Prospects of obtaining and using proteins of secondary fish raw materials]. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda*, 2018, no. 1, pp. 5–10.

6. Vorobyev V. I. Ispol'zovanie rybnogo kollagena i produktov ego gidroliza [Use of fish collagen and products of its hydrolysis]. *Izvestiya KGTU*, 2008, no. 13, pp. 55–58.

7. Marine Proteins and Peptides. Biological activities and applications. Ed.: by S. K. Kim. John Wiley and Sons. Moscow, 2013, 785 p.

8. Grishin D. V., Podobed O. V., Gladilina Yu. A., Pokrovskaya M. V., Sokolov N. N. Bioaktivnye belki i peptidy: sovremennoe sostoyanie i novye tendentsii prakticheskogo primeneniya v pishchevoy promyshlennosti i kormoproizvodstve [Bio-

active proteins and peptides: current state and new trends of practical application in the food industry and feed production]. *Voprosy onkologii*, 2017, vol. 63, no. 3, pp. 497–505.

9. Antipova L. V., Glotova I. A. *Ispol'zovanie vtorichnogo kollagensoderzhashchego syr'ya myasnoy promyshlennosti* [The use of secondary collagen-containing raw materials of the meat industry]. Saint-Petersburg, GIORД Publ., 2006, 384 p.

10. Heling A., Grimm T., Volkov V. V., Mezenova N. Yu. Proteiny iz vtorichnogo rybnogo syr'ya kak innovatsionnye komponenty sportivnogo pitaniya [Proteins from secondary fish raw materials as innovative components of sports nutrition]. *Izvestiya KGTU*, 2015, no. 39, pp. 85–94.

11. Romanenko N. Yu., Mezenova O. Ya., Nekrasova Yu. O. Sovremennye produkty sportivnogo pitaniya [Modern sports nutrition products]. *Vestnik MGTU*, 2021, vol. 24, no. 4, pp. 414–427.

12. Mezenova O. Ya., Maksimova S. N., Agafonova S. V., Romanenko N. Yu., Kalinina N. S., Volkov V. V., Merzel Y. T. Otsenka biopotentsiala vtorichnogo krabovogo syr'ya i produktov ego gidroliza dlya ispol'zovaniya v akvabiotekhnologii [Assessment of the biopotential of secondary crab raw materials and products of its hydrolysis for use in aquabiototechnology]. *Vestnik MAKH*, 2023, no. 3, pp. 44–52.

13. Heling A., Grimm T., Volkov V. V., Mezenova N. Yu. Issledovaniya razlichnykh sposobov gidroliticheskogo protsessa vtorichnogo rybnogo syr'ya konservnogo proizvodstva [Studies of various methods of hydrolytic process of secondary fish raw materials of canning production]. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda*, 2016, no. 1, pp. 3–8. DOI: 10.21047/1606-4313-2016-16-1-3-8.

14. Mezenova O. Ya., Volkov V. V., Merzel T., Grimm T., Kuhn. S., Heling A., Mezenova N. Yu. Sravnitel'naya otsenka sposobov gidroliza kollagensoderzhashchego syr'ya pri poluchenii peptidov i issledovanii ikh aminokislotnoy sbalansirovannosti [Comparative evaluation of the methods of hydrolysis of collagen-containing raw materials in the production of peptides and the study of their amino acid balance]. *Izvestiya VUZov, Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya*, 2018, vol. 8, no. 4, pp. 83–94.

15. Agafonova S. V., Baydalina L. S., Volkov V. V., Gorodnichenko L. V., Grimm T., Mezenova N. Yu., Mezenova O. Ya., Heling A. Sposob polucheniya pishchevykh dobavok iz vtorichnogo rybnogo syr'ya s primeneniem gidroliza [Method of obtaining food additives from secondary fish raw materials using hydrolysis]. Patent RF, no. 2681352 C1, 2018.

Информация об авторах

Е. А. Баженов – аспирант 4 курса обучения

Л. С. Байдалинова – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник

В. В. Волков – генеральный директор ООО «Биотех»

Т. Гримм – управляющий директор технологической лаборатории, руководитель отдела исследований и разработок

Information about the authors

Е. А. Bazhenov – 4th year postgraduate student

L. S. Baydalinova – PhD in Engineering, Associate Professor, Senior Researcher

V.V. Volkov – General Director of Biotech LLC

T. Grimm - Managing Director of the Technology Laboratory, Head of the Research and Development Department

Статья поступила в редакцию 10.06.2023; одобрена после рецензирования 25.09.2023; принята к публикации 10.10.2023.

The article was submitted 10.06.2023; approved after reviewing 25.09.2023; accepted for publication 10.10.2023.

СУДОСТРОЕНИЕ, МАШИНОСТРОЕНИЕ И ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья
УДК 629.5.064.5
DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-105-116

Оценка влияния частотно-регулируемых асинхронных электроприводов на функционирование судовых энергетических установок и их элементов

Валерий Феодосиевич Белей¹, Кирилл Викторович Коротких²

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

¹vbeley@klgtu.ru

²kirill-korotkikh@bk.ru

Аннотация. Показано, что использование в судовых энергетических установках энергосберегающих частотно-регулируемых асинхронных электроприводов вместо традиционных (контактор-асинхронный двигатель) позволяет снизить потребление электроэнергии в долевых режимах в разы, значительно расширить функциональные возможности оборудования. Однако при работе частотно-регулируемого электропривода имеет место эмиссия в питающую сеть высших гармоник тока, а к асинхронному электродвигателю наряду с основной гармоникой подаются гармоники напряжения. Гармоники тока, распространяясь по системе электроснабжения, приводят к снижению эффективности работы элементов судовых энергетических установок, в состав которых они входят. Установлено, что во всех режимах работы электропривода имеют место высокие значения потребляемой реактивной мощности. При большом числе частотно-регулируемых асинхронных электроприводов на судне будет невозможна полная загрузка дизель-генераторов по активной мощности. При работе частотно-регулируемого электропривода эмиссируются в питающую сеть гармоники тока, кратные трем. Эти гармоники являются токами нулевой последовательности. Так как судовая сеть не имеет нулевого провода, то ток третьей гармоники от одной фазы замыкается по проводам двух других фаз. Этот ток создает в электрических машинах поле нулевой последовательности с вытекающими последствиями. Наибольший интерес вызывают результаты экспериментальных исследований спектра вибраций при 10 %-й нагрузке на валу асинхронного двигателя: на частоте, близкой к 20 Гц, что может свидетельствовать о несимметрии полюсов исследуемого асинхронного двигателя; на частоте 300 Гц от взаимодействия моментов пятой (обратной последовательности) и седьмой (прямой последовательности) гармоник; на частоте 50 Гц, обусловленной воздействием основной гармоники.

Ключевые слова: судовые энергетические установки, судовая электроэнергетическая сеть, частотно-регулируемый электропривод, гармоники, ток, напряжение, момент, вибрация.

Для цитирования: Белей В. Ф., Коротких К. В. Оценка влияния частотно-регулируемых асинхронных электроприводов на функционирование судовых энергетических установок и их элементов // Известия КГТУ. 2023. № 71. С. 105-116. DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-105-116

Original article

Assessing the influence of frequency-controlled asynchronous electric drives on the operation of ship power plants and their elements

Valeriy F. Beley¹, Kirill V. Korotkikh²

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

¹vbeley@klgtu.ru

²kirill-korotkikh@bk.ru

Abstract. The paper shows that the use of energy-saving frequency-controlled asynchronous electric drives in ship power plants instead of traditional ones (contactor-induction motor) makes it possible to reduce electricity consumption in fractional modes several times and significantly expand the functionality of the equipment. However, during the operation of a frequency-controlled electric drive, higher current harmonics are emitted into the supply network, and voltage harmonics are supplied to the asynchronous electric motor along with the main harmonic. Current harmonics, propagating through the power supply system, lead to a decrease in the efficiency of the elements of ship power plants in which they are part of. It has been found that in all modes of operation of the electric drive, there are large values of the consumed reactive power. With a large number of frequency-controlled asynchronous electric drives on a ship, diesel generators will not be able to fully load them in terms of active power. During the operation of a frequency-controlled electric drive, current harmonics that are multiples of three are emitted into the supply network. These harmonics are zero sequence currents. Since the ship's network does not have a neutral wire, the third harmonic current from one phase is closed through the wires of the other two phases. This current creates a zero-sequence field in electrical machines with the ensuing consequences. Of greatest interest are the results of experimental studies of the vibration spectrum at 10% load on the shaft of an asynchronous motor: at a frequency close to 20 Hz, which may indicate asymmetry of the poles of the asynchronous motor under study, at a frequency of 300 Hz from the interaction of moments of the fifth (reverse sequence) and seventh (positive sequence) harmonics, at a frequency of 50 Hz, due to the influence of the main harmonic.

Keywords: ship power plants, ship electric power network, frequency-controlled electric drive, harmonics, current, voltage, torque, vibration.

For citation: Beley V. F., Korotkikh K. V. Assessing the influence of frequency-controlled asynchronous electric drives on the operation of ship power plants and their elements // *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2023; (71):105-116. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-105-116

ВВЕДЕНИЕ

Основными потребителями электроэнергии в судовых электроэнергетических системах являются асинхронные электроприводы, обеспечивающие функционирование значительной части судовых энергетических установок и их элементов. При появлении на рынке статических полупроводниковых преобразователей частоты на базе IGBT-транзисторов были разработаны и получили широкое распространение частотно-регулируемые электроприводы. Структура частотно-регулируемого электропривода выполняется на основе преобразователя частоты с промежуточным звеном постоянного тока, что обеспечивает регулирование скоростью вращения асинхронных двигателей. Использование энергосберегающих частотно-регулируемых асинхронных электроприводов позволяет снизить потребление электроэнергии в разы, значительно расширить функциональные возможности энергоустановок [1–4]. Однако при работе частотно-регулируемого электропривода имеет место эмиссия в питающую сеть высших гармоник тока, а к асинхронному двигателю наряду с основной гармоникой подаются гармоники напряжения. Токи высших гармоник, распространяясь по системе, вызывают снижение эффективности генерации судовых дизель-генераторов, передачи и использования электрической энергии; старение изоляции электрооборудования; вибрацию асинхронных электроприводов и элементов судовых энергетических установок, в состав которых они входят, и прочее. Анализ работ по данному направлению показал, что комплекс проблем, имеющих место, изучен недостаточно и проведение теоретических и экспериментальных исследований высших гармонических составляющих при эксплуатации частотно-регулируемых асинхронных электроприводов актуально.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

При частотном управлении асинхронным электродвигателем (АД) (рис. 1) величина электромагнитного момента АД зависит от частоты и напряжения источника переменного тока [5], где УУПЧ – устройство управления преобразователем частоты; В – выпрямитель с индуктивно-емкостным фильтром постоянного напряжения (ФПН); АИН – автономный инвертор напряжения, построенный на силовых транзисторах типа IGBT и формирующий основную гармонику выходного напряжения методом широтно-импульсной модуляции.

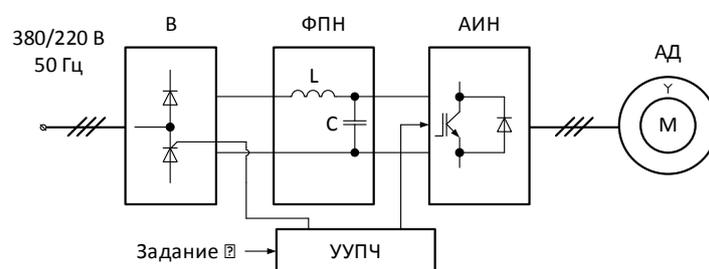


Рис. 1. Функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода

Fig. 1. Functional diagram of a frequency-controlled asynchronous electric drive

Наличие двух независимых каналов управления дает возможность реализовать в системах «преобразователь частоты – АД» различные законы регулирования скорости. Если должна сохраняться постоянной перегрузочная способность двигателя, то в первом приближении частотный закон управления имеет вид:

$$\frac{U}{U_c} \approx \frac{f}{f_c} \cdot \sqrt{\frac{M_d}{M_{дн}}}, \quad (1)$$

где U_c, f_c – номинальные напряжение и частота сети; U, f – напряжение и частота на выходе АИН; $M_d, M_{дн}$ – текущее и номинальные значения момента АД.

Управление двигателем в соответствии с соотношением (1) при ненасыщенной магнитной системе позволяет сохранять практически неизменным коэффициент мощности и абсолютное скольжение электропривода, при этом его коэффициент полезного действия не зависит от скорости. В зависимости от видов нагрузки закон управления напряжением и частотой имеет различные формы. Например, при постоянном моменте нагрузки ($M_c = \text{const}$) соотношение (рис. 2а) приобретает вид $U/f = \text{const}$; при постоянной мощности ($M_c = k\omega^{-1}$) – $U^2/f = \text{const}$ (рис. 2б); при «вентиляторной» нагрузке ($M_c = k\omega^2$) – $U/f^2 = \text{const}$ (рис. 2в) [5].

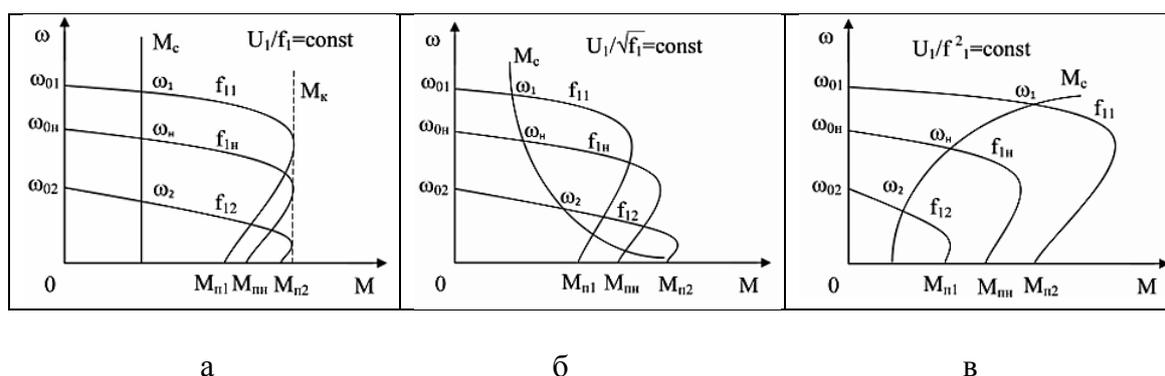


Рис. 2. Механические характеристики частотно-регулируемого асинхронного электропривода

Fig. 2. Mechanical characteristics of a frequency-controlled asynchronous electric drive

Использование в силовой схеме частотно-регулируемого асинхронного электропривода полупроводниковых элементов (рис. 1) приводит к эмиссии в питающую сеть высших гармоник тока, а к обмотке статора асинхронного электродвигателя наряду с основной гармоникой подаются гармоники напряжения.

Экспериментальные исследования энергетических характеристик, высших гармонических, имеющих место при эксплуатации частотно-регулируемого асинхронного электропривода, были проведены на лабораторном стенде частотно-регулируемого асинхронного электропривода (табл. 1, рис. 3).

Таблица 1. Технические параметры АД типа 4АА63В4, схожего с АИР63В4 [6]
 Table 1. Technical parameters of AM type 4АА63V4, similar to АИР63V4 [6]

Тип	$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$I_{ном}$, А	$\cos\varphi_{ном}$	$n_{синх}$, об/мин	$S_{ном}$, %	$I_{пуск}/I_{ном}$	$M_{max}/M_{ном}$	$M_{ном}/H \cdot M$	$\Delta P_{мех}$, Вт
4АА63В4	0,37	380	1,2	0,7	1500	9	5	2,2	1,4	11

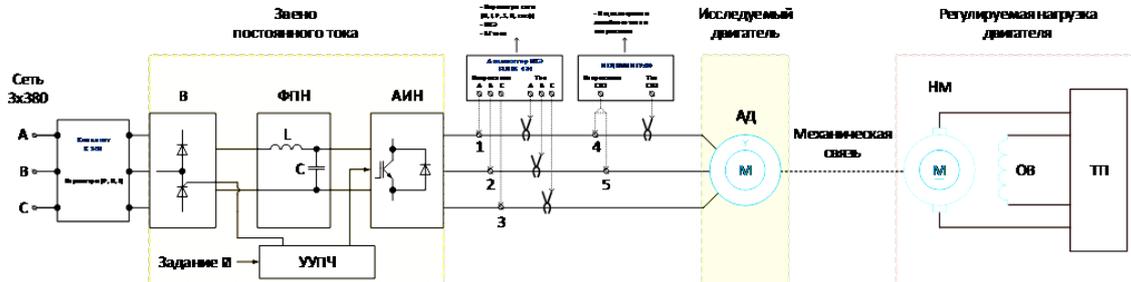


Рис. 3. Функциональная схема по исследованию частотного электропривода
 Fig. 3. Functional diagram for the study of the frequency drive

Измерения электрических параметров на входе частотного электропривода проводились посредством измерительного комплекта K505 (рис. 3). Нагрузка на валу АД создавалась с помощью двигателя постоянного тока, работающего в режиме генератора.

Таблица 2. Электрические параметры на входе двигателя при различных уровнях нагрузки на валу АД
 Table 2. Electrical parameters at the motor input at different levels of load on the AM shaft

I_1 , А	U_{AB} , В	U_{AN} , В	P_1 , Вт	Q_1 , ВАр	S_1 , ВА	$\cos\varphi_{ЭКВ}$
1,1	403,7	236	644	425	1414	0,46
0,8	402,9	235	556	401	1302	0,43
0,6	402,7	234	537	403	1288	0,40
0,4	402,8	235	403	314	1007	0,39
0,1	403,5	236	168	135	438	0,38

Так как ток, потребляемый АД, имеет несинусоидальный характер, квадрат полной мощности не равен сумме квадратов активной и реактивной мощностей (выражение 2) [7].

$$S^2 \neq P^2 + Q^2 \quad (2)$$

Следует отметить, что во всех режимах работы электропривода имеют место большие значения потребляемой реактивной мощности (табл. 2). Номинальное значение $\cos\varphi$ судовых дизель-генераторов обычно не превышает 0,8. При большом числе частотно-регулируемых асинхронных электроприводов на судне будет невозможна полная загрузка дизель-генераторов по активной мощности [8].

Значение суммарного коэффициента гармонических составляющих тока и отдельных гармоник определяется по выражениям [9]:

$$K_I = THD_I, \% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N (I_{(n)}^2)}}{I_1} \cdot 100\%, \quad (3)$$

$$K_{I(n)} = \frac{I_{(n)}}{I_{(1)}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $I_{(n)}$ – действующее значение амплитуды n -й гармоники тока; n – порядков гармонической составляющей тока; N – порядок последней из учитываемых гармонических составляющих тока.

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U не превышает 1,3 %.

Таблица 3. Гармонический состав тока, эмиссируемый электроприводом в питающую сеть, при различных нагрузках на валу асинхронного двигателя

Table 3. Harmonic composition of the current emitted by the electric drive to the supply network, at various loads on the shaft of the asynchronous motor

Параметры Нагрузка, %	Фаза	THD _I , %	H3, %	H5, %	H7, %	H9, %	H11, %	H13, %	H15, %
100	A	218,5	16,0	96,6	91,4	12,1	86,8	77,4	6,5
	B	196,8	1,9	93,8	91,2	2,4	79,0	75,2	3,5
	C	217,6	16,3	95,7	94,2	12,1	83,9	79,9	4,4
75	A	224,1	23,4	96,5	92,5	18,6	87,1	79,5	11,1
	B	204,1	7,4	95,0	91,0	7,0	82,4	76,0	5,5
	C	227,6	15,2	95,6	95,6	12,3	85,0	84,0	6,7
50	A	228,9	29,8	95,9	92,8	24,6	86,7	80,6	16,3
	B	204,5	12,5	95,0	88,9	13,2	83,6	73,6	11,8
	C	229,4	15,7	94,6	96,3	13,4	83,6	85,6	8,8
25	A	234,2	28,0	97,4	91,7	23,9	90,1	78,9	17,2
	B	207,5	10,0	93,8	90,7	10,5	92,1	77,3	9,1
	C	235,0	16,0	94,9	96,9	14,1	84,5	87,1	9,9
10	A	247,8	45,1	96,5	91,0	39,8	89,7	78,6	31,8
	B	214,7	6,0	92,7	91,7	7,9	80,7	79,7	8,7
	C	243,5	38,3	96,2	95,8	33,6	85,6	84,9	24,0

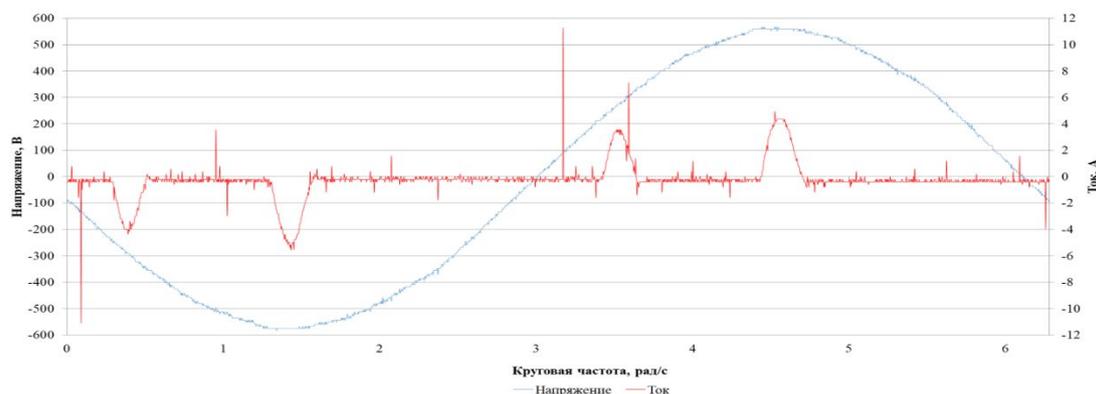


Рис. 4. Осциллограммы сетевого тока и напряжения при мощности на валу асинхронного двигателя, равной $0,5P_{\text{ном}}$

Fig. 4. Oscillograms of the network current and voltage at a power on the shaft of an asynchronous motor equal to $0.5P_{\text{nom}}$

Наибольшие по величине эмиссируемые в сеть гармоники тока – $n = 5, 7, 11, 13$, что обусловлено использованием шестифазного выпрямителя (рис. 1):

$$n = 6 \cdot p \pm 1; \quad I_n \approx I_1/n, \quad (5)$$

где, $p = 1, 2 \dots n$; I_1 и I_n – соответственно первая и n -я гармоники тока.

Величины этих гармоник незначительно зависят от нагрузки на валу АД. Распространяясь по элементам судовой электроэнергетической системы, они приводят к дополнительным потерям в кабелях, обмотках электрических машин и аппаратах [10]. Кроме того, 7-я и 13-я гармоники тока образуют прямую последовательность и создают вращающиеся моменты в электрических машинах, совпадающие с направлением вращения ротора, а 5-я и 11-я гармоники образуют обратную последовательность и создают вращающиеся моменты в электрических машинах в обратном направлении. Как результат – появление тормозных моментов и вибраций на валу электрических машин на частотах 300 Гц и 600 Гц, а также увеличение мощности, потребляемой из сети за счет затрат мощности на компенсацию тормозных моментов, обусловленных токами 5-й и 7-й гармоник [11–13].

Представляет интерес наличие третьих гармоник тока, эмитируемых в питающую сеть. Эти гармоники являются токами нулевой последовательности. Так как судовая сеть не имеет нулевого провода (как и лабораторная установка), то ток 3-й гармоники от одной фазы замыкается по проводам двух других фаз. Этот ток создает в электрических машинах поле нулевой последовательности с вытекающими последствиями [12].

В табл. 4 и 5 приведены результаты обработки гармонического состава тока и напряжения на входе АД при различных уровнях нагрузки на валу АД.

Таблица 4. Гармонический состав тока на входе двигателя при различных уровнях нагрузки на валу

Table 4. Harmonic composition of the current at the motor input at various levels of load on the shaft

Параметры Нагрузка, %	Фаза	ТНД _p , %	Н3, %	Н5, %	Н7, %	Н9, %	Н11, %	Н13, %	Н15, %
100	A	29,5	0,2	22,9	10,9	0,3	9,0	6,0	0,1
	B	29,2	0,6	22,4	11,2	0,6	8,8	6,3	0,1
	C	29,6	0,5	23,2	10,6	0,4	9,3	5,9	0,6
75	A	30,3	0,3	22,9	11,1	0,5	9,0	6,2	0,2
	B	30,3	2,3	22,7	11,2	1,8	9,2	6,4	0,2
	C	31,0	0,5	23,2	10,8	0,4	9,4	6,2	0,9
50	A	30,9	0,4	22,7	11,2	0,6	9,0	6,2	0,3
	B	30,3	3,9	22,7	10,9	3,3	9,3	6,2	0,3
	C	31,2	0,5	22,9	10,8	0,4	9,3	6,3	1,2
25	A	31,6	0,4	23,1	11,0	0,6	9,3	6,1	0,3
	B	30,8	3,2	22,4	11,1	2,6	10,3	6,5	0,3
	C	32,0	0,5	23,0	10,9	0,5	9,4	6,4	1,4
10	A	33,5	0,6	22,9	11,0	1,0	9,3	6,1	0,5
	B	31,9	1,9	22,1	11,3	2,0	9,0	6,7	0,2
	C	33,1	1,2	23,3	10,8	1,1	9,5	6,3	3,3

Таблица 5. Гармонический состав напряжения на входе двигателя при различных уровнях нагрузки на валу

Table 5. Harmonic composition of the voltage at the motor input at various levels of load on the shaft

Параметры Нагрузка, %	Фазы	THD _U , %	H3, %	H5, %	H7, %	H9, %	H11, %	H13, %	H15, %
100	AB	3,1	0,7	1,5	2,2	0,6	1,1	0,5	0,3
75	AB	3,4	0,8	1,9	1,8	0,6	1,1	0,5	0,3
50	AB	3,7	0,8	1,7	2,6	0,3	1,1	0,4	0,3
25	AB	3,8	0,8	1,9	2,6	0,3	1,1	0,4	0,3
10	AB	4,0	0,8	1,9	2,6	0,3	1,2	0,4	0,3

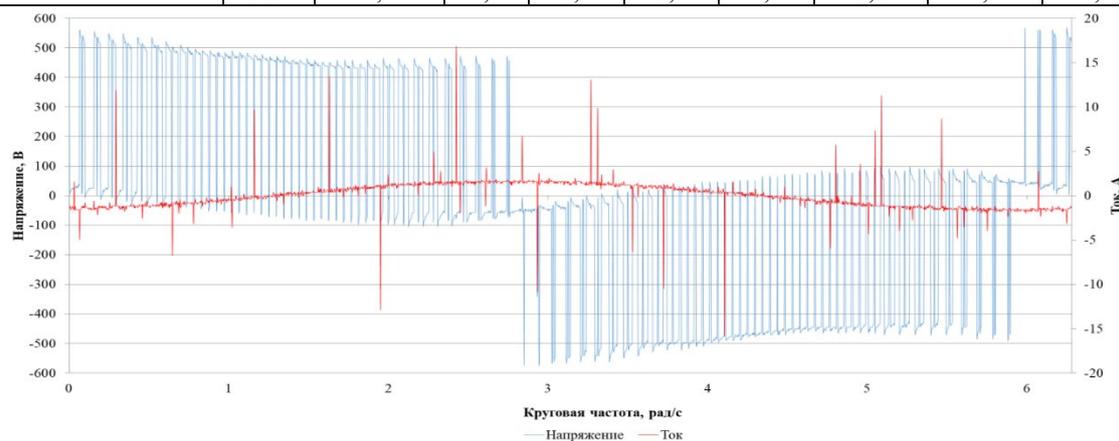


Рис. 5. Осциллограммы тока и напряжения на входе асинхронного двигателя при мощности на валу двигателя, равной $0,5P_{ном}$

Fig. 5. Oscillograms of current and voltage at the input of an asynchronous motor with a power on the motor shaft equal to $0.5P_{nom}$

Измерение частотного спектра сигналов осевых вибраций АД (f_x , f_y , f_z) посредством акселерометра показано на рис. 6.

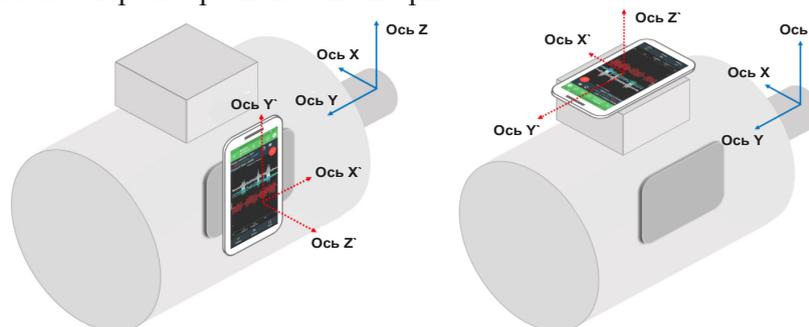


Рис. 6. Схема экспериментальной установки для измерения частотного спектра сигналов осевых вибраций асинхронного электродвигателя

Fig. 6. Scheme of the experimental setup for measuring the frequency spectrum of signals of axial vibrations of an asynchronous electric motor

Основными параметрами вибрации для оценки технического состояния динамических машин в соответствии с ГОСТ ИСО 10816-1 [14] являются виброскорость, виброперемещение и виброускорение.

Согласно исследованиям, проведенным в работах [13, 15, 16], данные о вибрации АД содержат существенную аналитическую информацию о внутренних электрических проблемах двигателя (состояние обмотки и сердечника статора и ротора, степень эксцентриситета воздушного зазора) и внешних электрических проблемах (несимметрия тока/напряжения, искажения формы волны напряжения в системе электроснабжения).

Нами были проведены экспериментальные исследования спектра вибраций при различных нагрузках на валу АД. Наибольший интерес вызывает спектр вибраций при нагрузке на валу АД = 0,1 $P_{ном}$. (рис. 7).

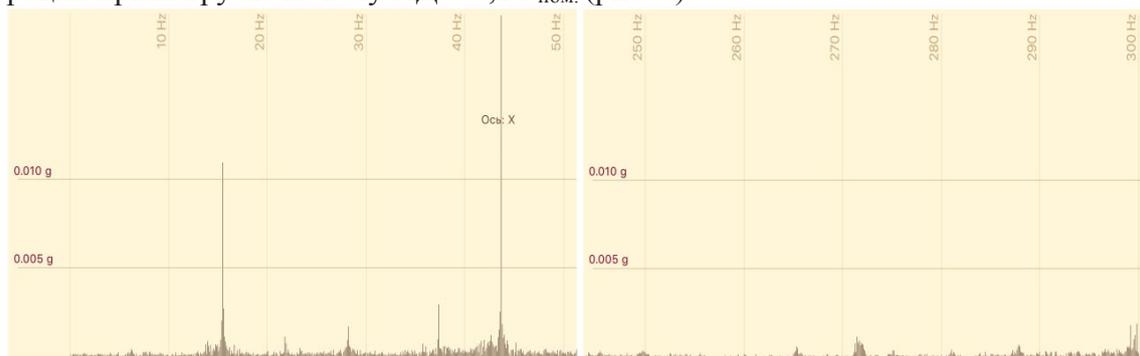


Рис. 7. Спектр вибраций исследуемого двигателя от 0 до 50 Гц и от 250 до 300 Гц при 10 %-й нагрузке на валу

Fig. 7. Vibration spectrum of the studied motor from 0 to 50 Hz and from 250 to 300 Hz at 10 % load on the shaft

Анализ спектра показывает, что имеют место три спектра вибраций: на частоте, близкой к 20 Гц, что может свидетельствовать о несимметрии полюсов исследуемого асинхронного двигателя [11]; на частоте 300 Гц от взаимодействия моментов 5-й (обратной последовательности) и 7-й (прямой последовательности) гармоник и на частоте 50 Гц, обусловленной воздействием основной гармоники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании экспериментальных исследований выявлен высокий уровень высших гармоник тока (3, 5, 7, 9, 11, 13), эмитируемых частотно-регулируемым электроприводом в питающую сеть до $K_1 = 229\%$. Как результат – создание тормозных моментов и появление вибраций на валу электрических машин и элементов судовых энергетических установок, в состав которых они входят на частотах 300 Гц и 600 Гц, а также увеличение мощности, потребляемой из сети за счет затрат мощности на компенсацию тормозных моментов, обусловленных токами 5 и 7, 11 и 13-й гармоник.

2. Во всех режимах работы электропривода имеют место высокие значения потребляемой реактивной мощности. При большом числе частотно-регулируемых асинхронных электроприводов на судне будет невозможна полная загрузка дизель-генераторов по активной мощности.

3. При работе частотно-регулируемого электропривода эмитируются в питающую сеть гармоники тока, кратные трем. Эти гармоники являются токами нулевой последовательности. Так как судовая сеть не имеет нулевого провода, то ток третьей гармоники от одной фазы замыкается по проводам двух других фаз.

Этот ток создает в электрических машинах поле нулевой последовательности с вытекающими последствиями.

4. Наибольший интерес вызывают результаты экспериментальных исследований спектра вибраций при нагрузке на валу АД = 0,1 P_{ном}: на частоте, близкой к 20 Гц, что может свидетельствовать о несимметрии полюсов исследуемого асинхронного двигателя; на частоте 300 Гц от взаимодействия моментов 5-й (обратной последовательности) и 7-й (прямой последовательности) гармоник; на частоте 50 Гц, обусловленной воздействием основной гармоники.

Список источников

1. Романенко Н. Г., Головки С. В., Жуманазаров М. П. Исследование свойств преобразователя частоты в качестве источника питания судового электрооборудования // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Морская техника и технология. 2017. № 1. С. 76–81.
2. Qin J., Liu Y., Grosvenor R. A framework of energy consumption modelling for additive manufacturing using internet of things // Proc. CIRP. 2017. V. 63. P. 307–312.
3. Batouta K., Aouhassi S., Mansouri K. Energy efficiency in the manufacturing industry – a tertiary review and a conceptual knowledge-based framework // Energy Reports. 2023. V. 9. P. 4635–4653.
4. Achieving energy efficiency with medium voltage variable speed drives for ventilation-on-demand in South African mines / Andries J. H. Nel, Deon C. Arndt, Jan C. Vosloo, Marc J. Mathews // Journal of Cleaner Production. 2019. V. 232. P. 379–390.
5. Шабалин Л. Д., Чушанков Д. Ю. Обоснование модернизации судовых электроприводов грузоподъемных устройств на системы с использованием преобразователей // Известия Калининградского государственного технического университета. 2016. № 42. С. 213–222.
6. Кравчик А. Э., Шлаф М. М., Афонин В. И. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник. Москва: Энергоатомиздат, 1982. 380 с.
7. Поливанов К. М. Теоретические основы электротехники: учеб. для вузов. Москва: Энергия, 1972. 240 с.
8. Белей В. Ф., Коротких К. В. Оценка режимов работы дизель-генераторов на основе диаграммы располагаемых мощностей // Известия Калининградского государственного технического университета. 2021. № 62. С. 135–145.
9. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. Москва: Стандартинформ, 2014. 19 с.
10. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. Москва: Энергоатомиздат, 1984. 160 с.
11. Арриллага Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
12. Копылов И. П. Электрические машины: учеб. пособие для вузов. Москва: Логос, 2000. 607 с.
13. Tsyupkin M. Induction Motor Condition Monitoring: Vibration Analysis Technique – Diagnosis of Electromagnetic Anomalies // Schaumburg, IL, USA. 2017.

URL:

https://www.academia.edu/36681354/Induction_Motor_Condition_Monitoring_Vibration_Analysis_Technique_a_Practical_Implementation (дата обращения: 1.07.2023).

14. ГОСТ ИСО 10816-1-97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования. Введ. 1999-08-01. Москва: Стандартинформ, 2014, 18 с.

15. Tsyppin M. Vibration of Induction Motors Operating with Variable Frequency Drives - a Practical Experience // IEEE 28-th Convention of Electrical and Electronics Engineers. 2014. Eilat, Israel. URL: https://www.academia.edu/35527361/Vibration_of_Induction_Motors_Operating_with_Variable_Frequency_Drives_a_Practical_Experience (дата обращения: 2.07.2023).

16. Романовский А. И. Исследование вибродиагностических признаков несимметрии тока асинхронного двигателя. Иркутск. 2009. С. 185–191. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vibrodiagnosticheskikh-priznakov-nesimmetrii-toka-asinhronnogo-dvigatelya> (дата обращения: 3.07.2023).

References

1. Romanenko N. G., Golovko S. V., Zhumanazarov M. P. Issledovaniye kharakteristik preobrazovaniya chastoty v kachestve istochnika pitaniya sudovogo elektrooborudovaniya [Study of the properties of the frequency converter as the power supply of the ship electric equipment]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2017, no. 1, pp. 76–81.

2. Qin J., Liu Y., Grosvenor R. A framework of energy consumption modelling for additive manufacturing using internet of things. *Proc. CIRP*. 2017, vol. 63, pp. 307–312.

3. Batouta K., Aouhassi S., Mansouri K. Energy efficiency in the manufacturing industry – a tertiary review and a conceptual knowledge-based framework. *Energy Reports*. 2023, vol. 9, pp. 4635–4653.

4. Andries J. H. Nel, Deon C. Arndt, Jan C. Vosloo, Marc J. Mathews. Achieving energy efficiency with medium voltage variable speed drives for ventilation-on-demand in South African mines. *Journal of Cleaner Production*. 2019, vol. 232, pp. 379–390.

5. Shabalin L. D., Chushankov D. Yu. Obosnovaniye modernizatsii sudovykh elektroprivodov gruzopod'yemnykh ustroystv na sistemy s ispol'zovaniyem preobrazovateley [Justification of modernization of ship electric drives of lifting devices for systems using converters]. *Izvestiya KGTU*, 2016, no. 42, pp. 213–222.

6. Kravchik A. E., Shlaf M. M., Afonin V. I. *Asinkhronnyye dvigateli serii 4A: spravochnik* [4A Series Induction Motors: handbook]. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1982. 380 p.

7. Polivanov K. M. *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki: ucheb. dlya vuzov* [Theoretical foundations of electrical engineering: textbook for universities]. Moscow. Energy Publ., 1972. 240 p.

8. Beley V. F., Korotkikh K. V. Otsenka rezhimov raboty dizel'-generatorov na osnove diagrammy raspologayemykh moshchnostey [Assessment of the operating mod-

es of a ship service diesel generator based on capability diagram]. *Izvestiya KGTU*, 2021, no. 62, pp. 135–144.

9. State Standard 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. Moscow. Standartinform Publ., 2014. 19 p. (In Russian.).

10. Zhezhelenko I. V. *Vysshiyе garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatiy* [Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises]. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1984. 160 p.

11. Arryllaga J., Bradley D., Bodger P. *Garmoniki v elektricheskikh sistemakh* [Power system harmonics]. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1990. 320 p.

12. Kopylov I. P. *Elektricheskiye mashiny: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Electric machines: textbook for universities]. Moscow. Logos Publ., 2000, 607 p.

13. Tsytkin M. Induction Motor Condition Monitoring: Vibration Analysis Technique – Diagnosis of Electromagnetic Anomalies. Schaumburg, IL, USA. 2017.: Available at: https://www.academia.edu/36681354/Induction_Motor_Condition_Monitoring_Vibration_Analysis_Technique_a_Practical_Implementation (Accessed 1 July 2023).

14. State Standard ISO 10816-1-97. Vibration. Monitoring the condition of machines based on the results of vibration measurements on non-rotating parts. Part 1. General requirements. Moscow. Standartinform Publ., 2014. 18 p. (In Russian).

15. Tsytkin M. Vibration of Induction Motors Operating with Variable Frequency Drives – a Practical Experience. IEEE 28-th Convention of Electrical and Electronics Engineers. 2014. Eilat, Israel.: Available at: https://www.academia.edu/35527361/Vibration_of_Induction_Motors_Operating_with_Variable_Frequency_Drives_-a_Practical_Experience (Accessed 2 July 2023).

16. Romanovskiy A. I. *Issledovaniye vibrodiagnosticheskikh priznakov nesimmetrii toka asinkhronnogo dvigatelya* [Investigation of vibrodiagnostic signs of asymmetry of the current of an asynchronous motor]. Irkutsk. 2009. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vibrodiagnosticheskikh-priznakov-nesimmetrii-toka-asinhronnogo-dvigatelya> (Accessed 3 July 2023).

Информация об авторах

В. Ф. Белей – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой энергетики

К. В. Коротких – аспирант кафедры энергетики

Information about the authors

V. F. Beley – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Power Engineering

K. V. Korotkikh – PhD student of the Department of Power Engineering

Статья поступила в редакцию 05.07.2023; одобрена после рецензирования 28.07.2023; принята к публикации 05.09.2023.

The article was submitted 05.07.2023; approved after reviewing 28.07.2023; accept for publication 05.09.2023.

Научная статья

УДК 629.552

DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-117-130

Влияние модернизации оконечностей корпуса парома на мореходные качества

Виктор Андреевич Белоусов¹, Сергей Васильевич Дятченко²

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

¹ viktor.belousov@klgtu.ru

² svd.ks@mail.ru

Аннотация. По причине растущей тенденции устаревания флота, обслуживающего паромные переправы, имеется большая необходимость в проектировании новых судов данного типа или модернизации существующих проектов. Так, согласно анализу Регистровой книги Федерального автономного учреждения «Российского классификационного общества» (РКО), за минувшие 10 лет было спущено на воду всего 3 парома на 115 паромных переправ внутренних водных путей Российской Федерации (ВВП РФ). В связи с этим статья посвящена обоснованию модернизации среднемагистрального автомобиле-пассажирского парома для ВВП РФ, а также ее влиянию на мореходные качества. Рассматриваемая модернизация проводится на базе новейшего среднемагистрального автомобильно-пассажирского парома, строящегося на территории Российской Федерации для нужд паромной переправы «Балтийск–Балтийская коса». Выбранный прототип имеет характерные для данного типа судов обводы, достаточную грузопместимость и другие особенности. Вместе с тем данный проект имеет и ряд отрицательных факторов, влияющих на мореходные качества. На основании описанных отрицательных качеств судна-прототипа спроектирован теоретический чертеж модернизированного судна. Влияние модернизации теоретического чертежа на мореходные качества определялось путем испытания физических моделей судна-прототипа и модернизированного судна в опытовом бассейне Научно-исследовательского центра судостроения Калининградского государственного технического университета (НИЦС КГТУ). Исследования проводились на тихой воде, на скоростях, эквивалентных эксплуатационным скоростям натурного судна. Вместе с тем во время модельных испытаний были осуществлены заезды на встречном регулярном волнении с характеристиками волн, определяемыми Российским классификационным обществом. По результатам описанных заездов определен ряд преимуществ модернизированного судна в сравнении с его прототипом.

Ключевые слова: паром, паромная переправа, слеминг, модельные испытания, построение теоретического чертежа, обводы судна, мореходные качества, судно-прототип, коэффициент остаточного сопротивления, Научно-исследовательский центр судостроения, опытовый бассейн, модернизация судна.

Для цитирования: Белоусов В. А., Дятченко С. В. Влияние модернизации оконечностей корпуса парома на мореходные качества // // Известия КГТУ. 2023. № 71. С. 117-130. DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-117-130

Original article

Influence of modernization of the ends of the ferry hull on seaworthiness

Viktor A. Belousov¹, Sergey V. Dyatchenko²

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

¹ viktor.belousov@klgtu.ru

² svd.ks@mail.ru

Abstract. Due to the growing trend of aging of the ferry fleet, there is a great need to design new vessels of this type or modernize existing projects. Thus, according to an analysis of the Register Book of the Federal Autonomous Institution "Russian Classification Society", over the past 10 years, only 3 ferries were launched for 115 ferry crossings on the Inland Waterways of the Russian Federation (here in after referred to as the IW of RF). In this connection, the article is devoted to the rationale for the modernization of a medium-haul car-passenger ferry for the Russian Federation, as well as its impact on seaworthiness. The modernization under consideration is carried out on the basis of the newest medium-haul automobile-passenger ferry, which is being built on the territory of the Russian Federation, for the needs of the Baltiysk-Baltiyskaya Kosa ferry crossing. The selected prototype has contours characteristic of this type of vessel, sufficient cargo capacity and other features. At the same time, this project also has a number of negative factors affecting seaworthiness. Based on the described negative qualities of the prototype vessel, a theoretical drawing of the modernized vessel has been designed. The effect of modernizing the theoretical drawing on seaworthiness was determined by testing physical models of the prototype vessel and the modernized vessel in the test pool of the Shipbuilding Research Center. The studies have been carried out in calm water, at speeds equivalent to the operational speeds of a full-scale vessel. At the same time, during the model tests, races have been carried out in regular oncoming waves, with wave characteristics determined by the Russian Classification Society. Based on the results of the described races, a number of advantages of the modernized vessel have been determined in comparison with its prototype.

Keywords: ferry, ferry crossing, slamming, model tests, construction of a theoretical drawing, Rules of the Russian Classification Society, vessel contours, seaworthiness, prototype vessel, residual resistance coefficient, shipbuilding research center, experimental pool, modernization of the vessel.

For citation: Belousov V. A., Dyatchenko S. V. Influence of modernization of the ends of the ferry hull on seaworthiness. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2023; (71):117-130. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-117-130

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день имеется необходимость в обновлении судов, обслуживающих паромные переправы внутренних водных путей Российской Федера-

ции. Согласно Регистровой книге РКО [1], за минувшие 10 лет было спущено всего 3 паромов на 115 паромных переправ внутренних водных путей Российской Федерации, в связи с чем имеется необходимость в проектировании новых судов данного типа или улучшении существующих проектов. В качестве судна-прототипа выбран наиболее современный проект среднемагистрального автомобиле-пассажирского парома на электроходе, не имеющий аналогов на территории Российской Федерации.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ФОРМЫ КОРПУСА

В качестве объекта исследования рассматривается среднемагистральный автомобиле-пассажирский паром шифра «ЭКО-Паром» [2]. Район плавания такого судна определяется разрядом «Р» акваторий, внутренних водных путей Российской Федерации по классификации РКО [3]. Обводы корпуса данного парома показаны на рис. 1, план палубы – на рис. 2. Основные геометрические характеристики судна представлены в табл. 1.

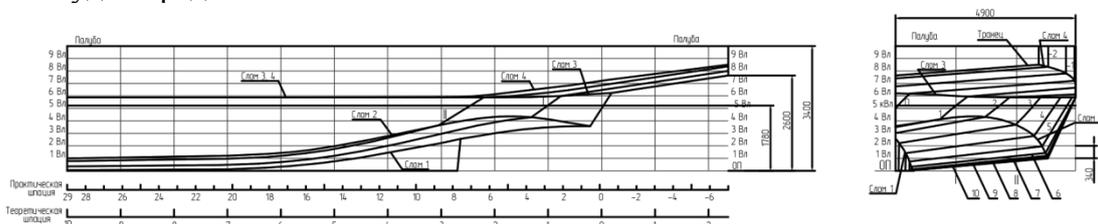


Рис. 1. Форма корпуса парома шифра «ЭКО-Паром»
 Fig. 1. Hull form of ferry, type «ECO-Ferry»

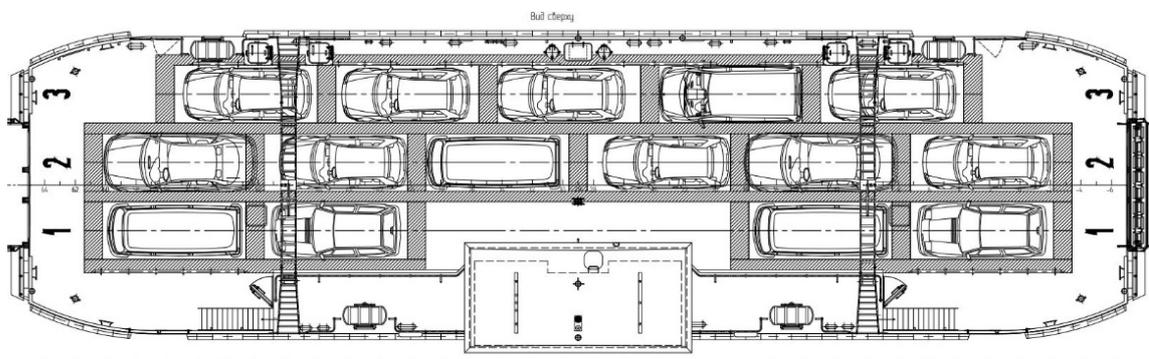


Рис. 2. Общее расположение исходного судна
 Fig. 2. General layout of the original vessel

Таблица 1. Основные геометрические характеристики ЭКО-Парома
 Table 1. Basic geometric characteristics of the «ECO-Ferry»

№	Наименование характеристики	Значение
1	Длина наибольшая, м	36,0
2	Ширина наибольшая, м	9,80
3	Осадка, м	1,78
4	Высота борта на миделе, м	3,40
5	Количество перевозимых автомобилей, шт.	15
6	Количество перевозимых пассажиров, чел.	80

Форма шпангоутов на проекции «корпус» является характерной для судов данного типа, однако форма оконечностей этого паромы имеет ряд отрицательных качеств.

Во-первых, за счет свесов на (-1)–(-7) шпангоутах и симметричных 59–65 шпангоутах увеличивается площадь парусности судна, которая может отрицательно повлиять на его маневренные качества.

Во-вторых, описанные оконечности могут принимать больше ударных нагрузок от встречных волн, поскольку высота волны акватории разряда «Р» составляет до 1,2 м.

В-третьих, оконечности такого рода во время заморозков больше подвержены обледенению [4], причем доступа для обкалывания льда непосредственно с судна нет. В таком случае при обледенении нижней части свесов «ЭКО-Паром» будет работать по принципу бульдозера, толкая перед собой поверхностный слой воды, увеличивая сопротивление движению.

Исходя из описанных соображений была поставлена задача модернизации данного корпуса судна. В качестве технического задания на модернизацию установлено сохранение грузоподъемности (15 автомобилей и 80 пассажиров), а также улучшение мореходных качеств судна. В результате проработки нескольких вариантов изменения корпуса принято решение уменьшить конструктивную длину до 30 м за счет уменьшения свесов оконечностей, при этом остальные главные размеры (ширина, высота борта) оставить неизменными [5]. Теоретический чертеж модернизированного корпуса представлен на рис. 3, проработка плана верхней палубы – на рис. 4. Отсутствие свесов носовой и кормовой оконечности у нового судна (рис. 3) теоретически должно привести к уменьшению явления слемина за счет уменьшения достаточно больших плоских поверхностей в надводной части днища, а также к улучшению маневренных характеристик судна за счет снижения площади боковой парусности в оконечностях.

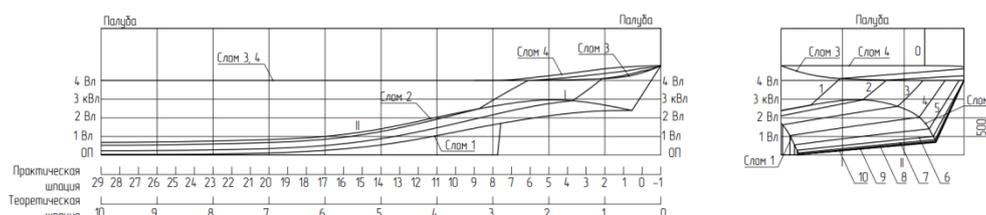


Рис. 3. Теоретический чертеж модернизированного судна
Fig. 3. Body plane of a modernized ferry

Графическая проработка плана верхней палубы (рис. 4) показала, что на новом судне можно разместить 15 автомобилей с учетом более компактной расстановки, т. е. уменьшая расстояния между автомобилями. Следует отметить, что расстояние между автомобилями регламентируется нормами Федерального дорожного агентства «РосАвтоДор» [6]. Данные требования предъявляются к автомобилям, которые располагаются в трюмных помещениях судов либо в твиндечном пространстве.

В случае судна «ЭКО-Паром» автомобили размещаются на верхней открытой палубе.

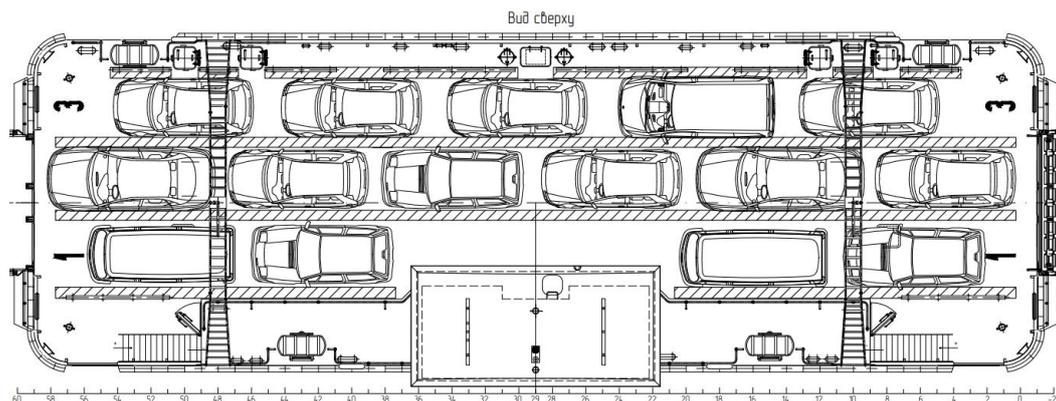


Рис. 4. План палубы и расположение автомобилей на грузовой палубе модернизированного парома

Fig. 4. Deck plan and arrangement of cars on the cargo deck of the modernized ferry

Следовательно, расстояние между перевозимыми автомобилями на модернизированном судне может быть уменьшено с целью сохранения грузоместимости. Пассажироместимость модернизированного судна по сравнению с исходным судном также осталась неизменной, т. к. пассажирские салоны находятся в средней части судна (11 шп.–23 шп., 35 шп.–49 шп.). Полученные в ходе модернизации геометрические характеристики представлены в табл. 2.

Таблица 2. Геометрические характеристики модернизированного судна

Table 2. Geometric characteristics of the modernized vessel

№	Наименование характеристики	Значение
1	Длина наибольшая, м	30,0
2	Ширина наибольшая, м	9,80
3	Осадка, м	1,67
4	Высота борта на миделе, м	3,40
5	Количество перевозимых автомобилей, шт.	15
6	Количество перевозимых пассажиров, чел.	80

ПРОВЕДЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

С целью подтверждения улучшения мореходных качеств модернизированного судна были подготовлены и проведены сравнительные модельные испытания в опытовом бассейне НИЦС КГТУ.

Достоверность полученных в ходе испытаний данных определялась путем использования штатной методики испытаний физических моделей в опытовом бассейне [7]. Описанная методика приближена к рекомендованным Международной конференцией для опытовых бассейнов (далее МКОБ) [8].

Для относительной оценки слеминга коллективом НИЦС КГТУ разработан специальный датчик, который представляет собой усеченный параллелепипед,

образующий так называемый «короб». В основании вырезано окно, закрывающееся стальным листом толщиной 0,1 мм («мембраной»).

Вся конструкция вставляется в вырезанное в корпусе отверстие, образуя плавный переход обвода корпуса с мембраной датчика, жестко крепится и герметизируется. Таким образом, любое воздействие волны на внешнюю поверхность мембраны передается на встроенный тензодатчик [9]. Сам тензодатчик представляет собой тензометрический полумост, приклеиваемый на стальной планке. С точки зрения деформации датчик представляет собой «нагруженную балку» с деформацией изгиба. Деформация изгиба или эквивалентная ей сила передается, фиксируется и записывается с использованием лабораторного измерительного комплекса [10].

Остальной перечень штатного лабораторного оборудования указан в [11].

Во время испытаний использовались две модели, представленные на рис. 5 и 6, разработанные по теоретическим чертежам исходного и модернизированного судна.



Рис. 5. Внешний вид модели «ЭКО-Парома»
Fig. 5. The appearance of the «ECO-Ferry» model



Рис. 6. Внешний вид модели судна «Паром-Модерн»
 Fig. 6. Appearance of the model of the ship «Parom-Modern»

Масштаб моделей определялся с учетом обеспечения подобия по числу Фруда [12].

В ходе испытаний рассматривались два случая нагрузки обоих судов – «порожнем» и «в полном грузу», т. е. при максимальном водоизмещении. Вследствие модернизации парома уменьшилось водоизмещение (в том числе из-за конструктивного уменьшения длины судна), исходя из этого изменилась и осадка модернизированного судна. В табл. 3 представлены основные характеристики испытываемых моделей.

Таблица 3. Характеристики испытываемых моделей
 Table 3. Characteristics of the tested models

Характеристика	Исходный проект «ЭКО-Паром»		Модернизированное судно «паром-модерн»	
	«Порожнем»	«В полном грузу»	«Порожнем»	«В полном грузу»
Длина по КВл, м	2,41	2,43	2,40	2,42
Ширина по КВл, м	0,782	0,800	0,779	0,792
Осадка судна	0,129	0,148	0,125	0,139
Площадь смоченной поверхности, м ²	21,2	22,8	20,9	22,0

На рис. 7 и 8 представлены фотографии с момента проведения испытаний на встречном регулярном волнении.



Рис. 7. Испытание модели «ЭКО-Паром» при осадке, эквивалентной 1,78 м натурального судна, на встречном волнении, высоте 1,2 м и длине 1,0 L
Fig. 7. Testing the "Eco-Parom" model with a draft equivalent to 1,78 m of a full-scale vessel, on a head wave equivalent to a height of 1,2 m and a length of 1,0 L

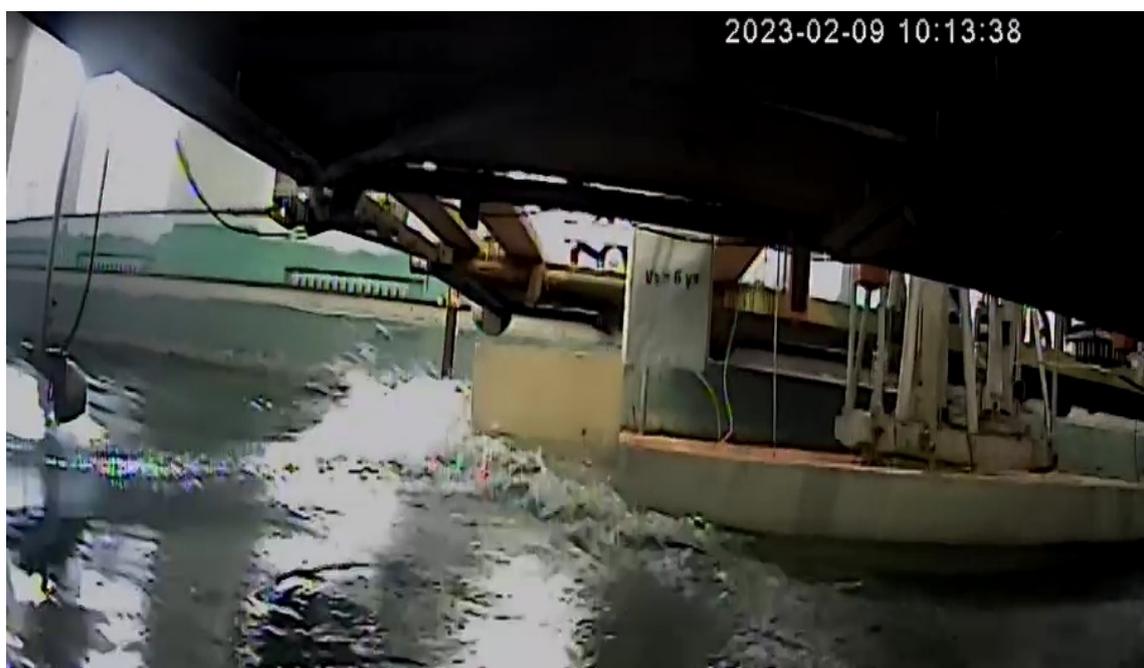


Рис. 8. Испытание модели «Паром-Модерн» при осадке, эквивалентной 1,5 м натурального судна, на встречном волнении, высоте 1,2 м и длине 1,0 L
Fig. 8. Testing of the "Parom-Modern" model with a draft equivalent to 1,50 m of a full-scale vessel, on a head wave equivalent to a height of 1,2 m and a length of 1,0 L

Диапазон скоростей при буксировке модели составляет 0,523 м/с; 0,627 м/с; 0,732 м/с; 0,840 м/с; 0,940 м/с, что соответствует скоростям 5,56 км/ч; 7,41 км/ч; 9,26 км/ч; 11,1 км/ч; 13,0 км/ч натурального судна.

В качестве расчетных волн были взяты три характерные волны. Их высота определяется требованиями Правил РКО [3], части «Классификация». Длина волны принята исходя из наиболее опасного случая, когда она пропорциональна длине судна. Характеристики волн представлены в табл. 4. Тарировка моделей для опытов с продольной качкой была выполнена согласно методике [13].

Таблица 4. Характеристики волн

Table 4. Wave characteristics

№ волны	Высота волны	Длина волны
1	1,2 м	1,0 L
2	1,2 м	1,2 L
3	0,75 м	1,2 L

Примечание: L – длина судна по ватерлинии.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Поскольку целью проведения указанных модельных испытаний явилось сравнение модернизированного корпуса судна относительно исходного («ЭКО-Парома»), было выполнено несколько циклов испытаний – на тихой воде и регулярном встречном волнении (курсовой угол волнения (КУВ) = 180 градусов).

Для возможности качественного сравнения обводов корпуса судна по результатам испытаний построены зависимости изменения коэффициента остаточного сопротивления от числа Фруда в двух случаях нагрузки – «порожнем» (рис. 9) и «в полном грузу» (рис. 10).

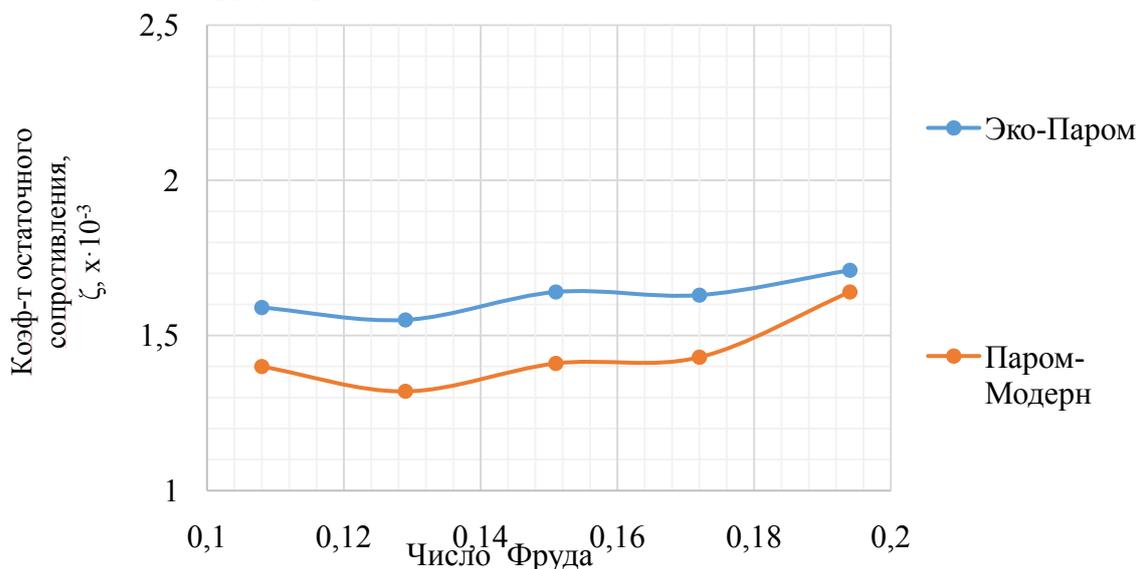


Рис. 9. Зависимость коэффициента остаточного сопротивления от числа Фруда в случае нагрузки «порожнем»

Fig. 9. Dependence of the coefficient of residual resistance on the Froude number, in the case of an "empty" load

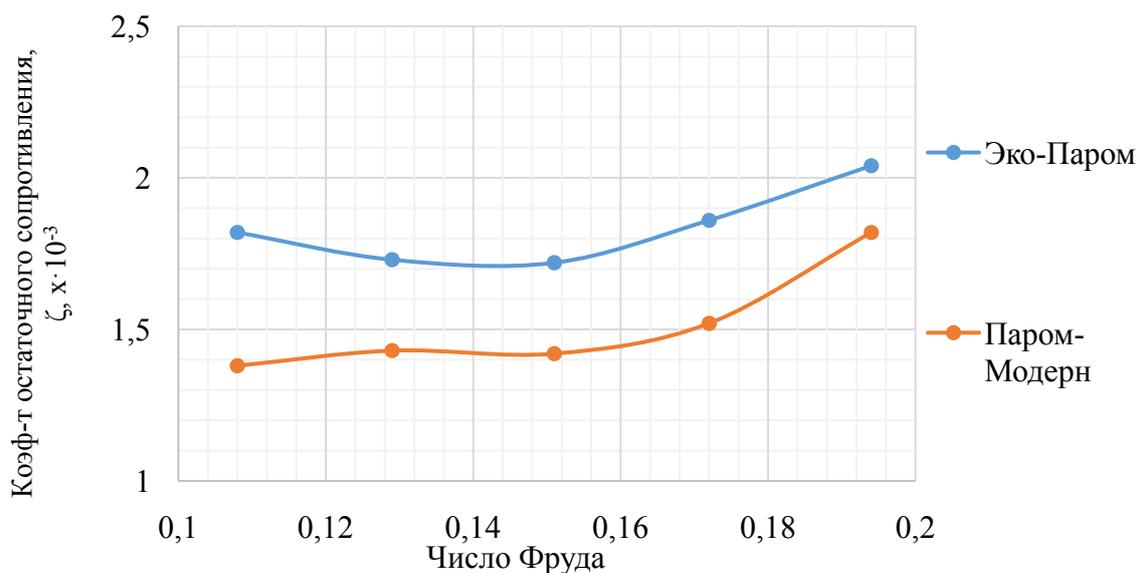


Рис. 10. Зависимость коэффициента остаточного сопротивления от числа Фруда в случае нагрузки «в полном грузу»

Fig. 10. Dependence of the coefficient of residual resistance on the Froude number, in the case of the load "full load"

Полученные зависимости могут быть использованы для пересчета буксировочного сопротивления натурального судна, а также для определения необходимой буксировочной мощности на эксплуатационной скорости хода.

Остаточное сопротивление – это характеристика, получаемая вычитанием из полного сопротивления (замеренного непосредственно в процессе эксперимента) и вязкостного сопротивления трения, рассчитываемого через коэффициент трения эквивалентной пластины (зависящий от площади смоченной поверхности). Таким образом, зависимость безразмерных величин коэффициента остаточного сопротивления от числа Фруда позволяет качественно сравнить оба корпуса судна.

Согласно результатам эксперимента, проведенного на тихой воде, значение коэффициента остаточного сопротивления у модернизированного корпуса уменьшилось на 14–17 %. Данный эффект можно объяснить меньшим влиянием носовой подпорной волны, образующейся при движении судна: у исходного судна «ЭКО-Паром» носовая подпорная волна «находила» на днищевую обшивку в надводной части оконечности судна, находящейся в непосредственной близости от свободной поверхности. В модернизированном корпусе судна, за счет отсутствия развитых свесов в оконечностях, носовая подпорная волна в значительно меньшей степени контактирует с корпусом, что и позволяет достигнуть положительного результата.

По полученным данным, в ходе буксировочных испытаний на встречном волнении построены графики буксировочного сопротивления натурального судна от скорости хода, а также зависимости слеминга от скорости судна. Характерные зависимости представлены на рис. 11 и 12 в соответствующих случаях нагрузки. Остальные результаты исследований показаны в [11].

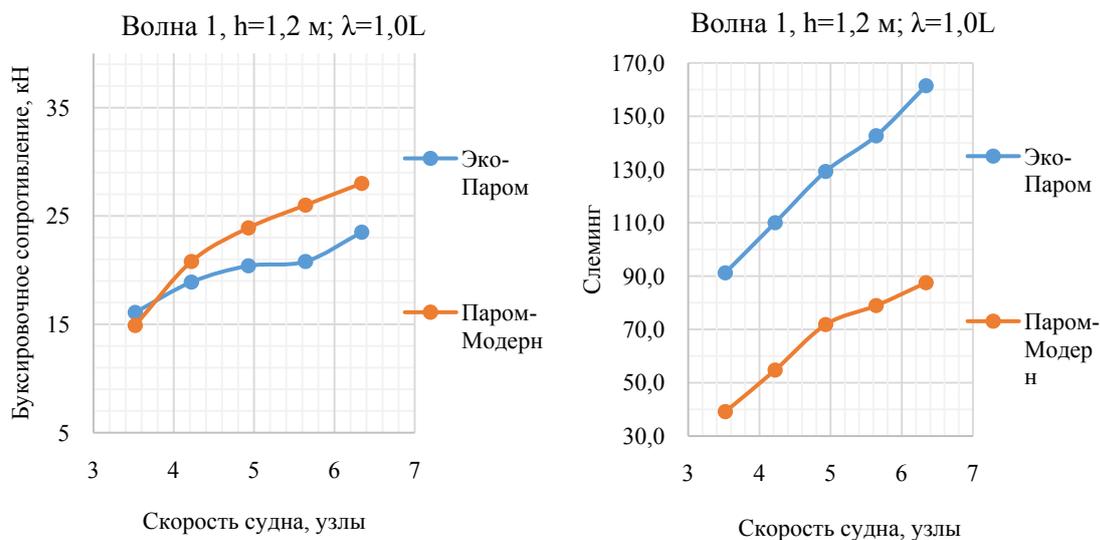


Рис. 11. Результаты испытаний на встречном волнении судна «порожнем»
 Fig. 11. The results of tests on the head waves of the «empty» vessel

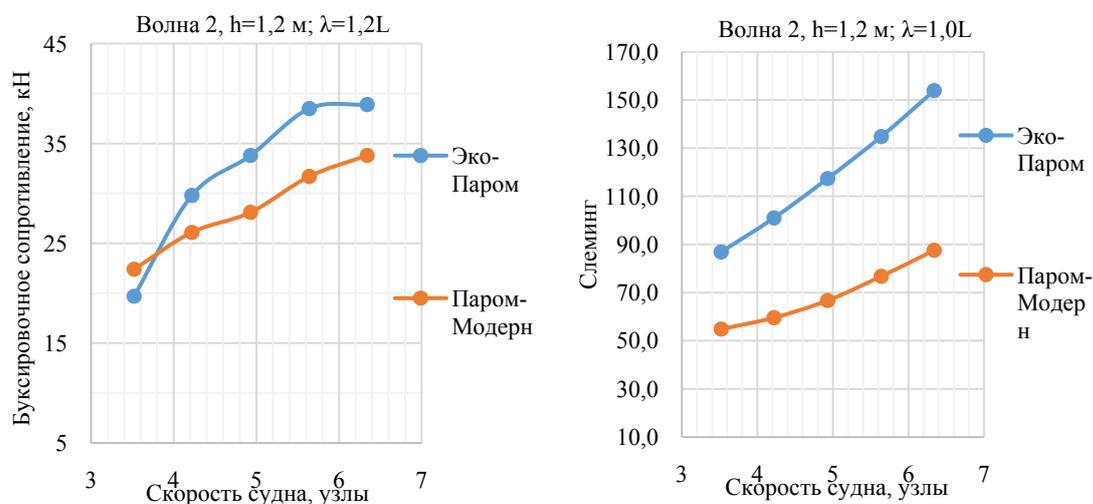


Рис. 12. Результаты испытаний на встречном волнении судна «в полном грузу»
 Fig. 12. The results of tests on the head waves of the «fully load» vessel

Представленные зависимости показывают явное преимущество модернизированного парама над его прототипом [14], однако в некоторых случаях, описанных в [11], модернизированные обводы увеличивают буксировочное сопротивление.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показывает анализ полученных данных буксировочных испытаний, в большинстве случаев паром с модернизированными обводами имеет преимущества перед судном-прототипом, на тихой воде коэффициент остаточного сопротивления удалось снизить на 8 % в случае нагрузки «порожнем» и на 17 % – в случае нагрузки «в полном грузу».

Испытания на встречном регулярном волнении показали, что независимо от случая нагрузки модернизированные обводы судна позволяют снизить носовой слеминг с 9,12 % до 48 % по сравнению с судном-прототипом.

Однако необходимо отметить, что в некоторых случаях буксировочное сопротивление судна-прототипа меньше, чем судна с новыми обводами. Например, у модернизированного судна «порожнем» описанная характеристика увеличивается на 12,8 %, зато новые обводы при осадке «в полном грузу» дадут преимущество в снижении данной характеристики в диапазоне от 7,21% до 21,7%.

Таким образом, основываясь на результатах модельных испытаний, можно полагать, что модернизированные обводы среднемагистрального парама окажут ряд преимуществ, а также снизят влияние описанных отрицательных факторов судна-прототипа.

Список источников

1. Регистровая книга Российского классификационного общества: справочник. Москва, 2023. 6764 с.
2. Техническое задание на ОКР «Создание среднемагистрального автомобильно-пассажирского экологически чистого парама на электроходу». Москва: МинПромТорг РФ, 2019. 11 с.
3. Правила классификации и постройки судов. Часть 0 «Классификация» // Российское классификационное общество. Москва, 2019. URL: <https://rfclass.ru/assets/Uploads/PKPS.pdf?t=321> (дата обращения: 18.05.23).
4. Курдюмов В. А., Тряскин В. Н., Хейсин Д. Е. Определение ледовой нагрузки и оценка ледовой прочности корпусов транспортных судов // Труды ЛКИ: Ледо-проходимость и ледовая прочность морских судов. 1979. С. 3–12.
5. Построение теоретического чертежа корпуса судна: учеб. пособие / Н. А. Мытник [и др.]. Комсомольск-на-Амуре: КНАПИ, 1992. 86 с.
6. Методические рекомендации по устройству, ремонту, содержанию и эксплуатации паромных переправ и наплавных мостов: отраслевой дорожный методический документ // Москва: Федеральное дорожное агентство (РосАвтоДор), 2013. 144 с.
7. 204-ЛМКС.000.001-МИ «Буксировочные испытания моделей судов. Методика». Калининград: ФГБОУ ВО «КГТУ», 2019. 48 с.
8. ITTC – Recommended Procedures and Guidelines. Testing and Extrapolation Methods Resistance. Resistance Test №7.5-02-02-01. International Towing Tank Conference. 2002. 11 с. URL: <https://ittc.info/media/1816/75-02-02-01.pdf>. (дата обращения: 12.05.23).
9. Тензодатчики для экспериментальных исследований / Н. П. Клокова [и др.]. Москва: Машиностроение, 1972. 152 с.

10. 204-11-ЛМКС.000.030.ПС «Комплексы измерительно-вычислительные МИС. Руководство по эксплуатации». Мытищи: НПП «Мера», 2014. 146 с.
11. Белоусов В. А. Проект модернизации среднемагистрального автомобиле-пассажи́рского парома. Магистерская диссертация. Калининград, 2023. 234 с.
12. Справочник по теории корабля: в трех томах. Том 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / под ред. Я. И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985. 768 с.
13. Методика тарировки модели судна для опытов с продольной качкой: инструкция // Калининград: Научно-исследовательский центр судостроения ФГБОУ ВО «КГТУ», 2017. 4 с.
14. Технический отчет по результатам модельных испытаний парома. ОКР «Создание среднемагистрального автомобильно-пассажи́рского экологически чистого парома на электроходу, шифр «ЭКО-Паром». Калининград: Научно-исследовательский центр судостроения ФГБОУ ВО «КГТУ», 2020. 76 с.

References

1. *Registrovaya kniga Rossiyskogo klassifikatsionnogo obshchestva: spravochnik* [Registry book of Russian Classify Society: handbook]. Moscow, 2023, 6764 p.
2. *Tekhnicheskoe zadanie na OKR «Sozdanie srednemastral'nogo avtomobil'no-passazhirskogo ekologicheski chistogo paroma na elektrokhodu»* [Technical specifications for development work Creation of a medium-haul automobile-passenger environmentally friendly ferry on an electric ship]. Moscow, MinPromTorg RF, 2019, 11 p.
3. *Pravila klassifikatsii i postroyki sudov. Chast' 0 "Klassifikatsiya"* [Rules for the classification and construction of ships. Part 0 "Classification"]. Rossiyskoe klassifikatsionnoe obshchestvo, Moscow, 2019. 48 p. Available at: <https://rfclass.ru/assets/Uploads/PKPS.pdf?t=321> (Accesed 18 May 2023).
4. Kurdyumov V. A., Tryaskin V. N., Kheysin D. E. *Opredelenie ledovoy nagruzki i otsenka ledovoy prochnosti korpusov transportnykh sudov* [Determination of ice load and ice strength of buildings at industrial enterprises]. Trudy LKI, Ledoprokhodimost' i ledovaya prochnost' morskikh sudov, 1979, pp. 3–12.
5. Mitnik N. A [i dr.] *Postroenie teoreticheskogo chertezha korpusa sudna: uchebnoe posobie* [Construction of a theoretical drawing of the ship hull: textbook]. Komsomol'sk na Amure, KnAPI Publ., 1992, 86 p.
6. *Metodicheskie rekomendatsii po ustroystvu, remontu, soderzhaniyu i ekspluatatsii paromnykh pereprav i naplavnykh mostov: otraslevoy dorozhnyy metodicheskiy dokument* [Methodological recommendations for the construction, repair, maintenance and operation of ferry crossings and floating bridges: industry road methodological document]. Moscow, Federal'noe dorozhnoe agentstvo (RosAvtoDor) Publ, 2013, 144 p.
7. 204-LMKS.000.001-MI «Buksirovochnye ispytaniya modeley sudov. Metodika» [Towing tests of ship models. Methodology]. FGBOU VO "KGTU", Kaliningrad, 2019. 48 p.
8. ITTC – Recommended Procedures and Guidelines. Testing and Extrapolation Methods Resistance. Resistance Test №7.5-02-02-01. International Towing Tank

Conference. 2002. 11 p. Available at: <https://ittc.info/media/1816/75-02-02-01.pdf>. (Accessed 12 May 2023).

9. Klokova N. P. [i dr.]. *Tenzodatchiki dlya eksperimental'nykh issledovaniy* [Strain gauges for experimental research]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972, 152 p.

10. 204-11-LMKS.000.030.PS Kompleksy izmeritel'no-vychislitel'nye MIC. Rukovodstvo po ekspluatatsii [Measuring and computing complexes MIC. Manual]. Mytishchi, NPP Mera, 2014, 146 p.

11. Belousov V. A. *Proekt modernizatsii srednemagistral'nogo avtomobile-passazhirskogo paroma. Magisterskaya dissertatsiya* [Modernization project of a medium-haul passenger car ferry. Master's dissertation]. Kaliningrad, 2023, 234 p.

12. *Spravochnik po teorii korablya v trekh tomakh. Tom 1. Gidromekhanika. Soprotivlenie dvizheniyu sudov. Sudovye dvizhiteli* [Handbook of ship theory: in three volumes. Volume 1. Fluid mechanics. Ship resistance. Ship propulsors]. Pod red. Ya. I. Voitkenskogo. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1985, 768 p.

13. Metodika tarirovki modeli sudna dlya opytov s prodol'noy kachkoy: instruktsiya [Method for calibrating a ship model for experiments with pitching: instructions]. Kaliningrad, Nauchno-isslevatel'skiy tsentr sudostroeniya FGBOU VO «KGTU», 2017, 4 p.

14. Tekhnicheskiy otchet po rezul'tatam model'nykh ispytaniy paroma. OKR «Sozдание srednemagistral'nogo avtomobil'no-passazhirskogo ekologicheskhi chistogo paroma na elektrokhodu, shifr «eko-parom» [Technical report on the results of model tests of the Ferry. EDW "Creation of a medium-haul automobile-passenger environmentally friendly ferry on an electric ship, code ECO-Ferry]. Kaliningrad, Nauchno-isslevatel'skiy tsentr sudostroeniya FGBOU VO «KGTU», 2020, 76 p.

Информация об авторах

В. А. Белоусов – инженер-конструктор Научно-исследовательского центра судостроения

С. В. Дятченко – доктор технических наук, доцент кафедры судостроения, судоремонта и морской техники

Information about the authors

V. A. Belousov – design engineer of the Shipbuilding Research Center

S. V. Dyatchenko – Doctor of Engineering, associate professor of the Department of shipbuilding, ship repair and marine engineering

Статья поступила в редакцию 19.09.2023; одобрена после рецензирования 18.10.2023; принята к публикации 19.10.2023.

The article was submitted 19.09.2023; approved after reviewing 18.10.2023; accept for publication 19.10.2023.

Научная статья

УДК629.017

DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-131-144

Анализ судовых моторных масел с помощью релаксации диэлектрической проницаемости

Оксана Владимировна Сынашенко¹, Николай Яковлевич Синявский², Наталья Анатольевна Кострикова³

^{1,2,3}Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

¹oksanasynashenko@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-3149-0345>

²nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1285-206X>

³natalia.kostrikova@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2969-0346>

Аннотация. В процессе эксплуатации судового моторного масла происходит его старение, основными факторами которого являются окислительная высокотемпературная деградация и загрязнение сажей, металлами износа, топливом, водой и охлаждающей жидкостью. В работе методом релаксационной диэлектрической спектроскопии исследован ряд отработанных судовых масел для определения их характеристик, связанных с деградацией смазочного материала и износом двигателя. Для судовых масел Total Disola M4015, Shell Rimula, Mobil 5W40, Mobil 10W40, Navigo TPEO 12/40 экспериментально получены зависимости относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь от частоты. Диэлектрическая проницаемость судовых моторных масел находится в пределах от 2,1 до 2,4 и зависит от вязкости, плотности масла, содержания в нем парафиновых, нафтеновых и ароматических соединений и пакета присадок. Увеличение содержания присадок повышает диэлектрическую проницаемость масла. Авторами исследована связь времен дипольной релаксации свежих и отработанных масел с кинематической вязкостью, с содержанием присадок и продуктов износа. Искомый массив распределения времен релаксации рассчитывался посредством регуляризации и метода наименьших квадратов с помощью алгоритма CONTIN. Вычисления проводились в программе RILT, работающей в среде MatLab. Показано, что поляризация и последующая дипольная релаксация вызываются молекулами присадок, которые срабатывают в процессе эксплуатации двигателя. Различия во временах релаксации могут быть вызваны также образованием ассоциаций, включающих дипольные молекулы. Данные, полученные в работе, могут быть использованы в дальнейшем для построения экспертной системы диагностики двигателя и определения параметров неизвестных масел.

Ключевые слова: моторные масла, дипольная поляризация, диэлектрическая проницаемость, релаксация.

Для цитирования: Сынашенко О. В., Синявский Н. Я., Кострикова Н. А. Анализ судовых моторных масел с помощью релаксации диэлектрической проницаемости // Известия КГТУ. 2023. № 71. С. 131-144. DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-131-144

Original article

Analysis of marine motor oils using dielectric permittivity relaxation

Oksana V. Synashenko¹, Nikolay Ya. Sinyavskiy², Natal'ya A. Kostrikova³

^{1,2,3}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

¹oksanasynashenko@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-3149-0345>

²nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1285-206X>

³natalia.kostrikova@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2969-0346>

Abstract. During exploitation of marine engine oil, its aging occurs, the main factors of which are oxidative high-temperature degradation and contamination with soot, wear metals, fuel, water and coolant. In this work, a number of used marine oils have been studied by relaxation dielectric spectroscopy to determine their characteristics associated with lubricant degradation and engine wear. For marine oils Total DISOLA M4015, Shell Rimula, Mobil 5W40, Mobil 10W40, Navigo TPEO 12/40, the dependences of the relative permittivity and the tangent of the loss angle on frequency have been experimentally obtained. The dielectric constant of marine motor oils ranges from 2.1 to 2.4 and depends on the viscosity, density of the oil, the content of paraffin, naphthenic and aromatic compounds in it and the additive package. An increase in the additive content increases the dielectric constant of the oil. The authors investigated the relationship of the dipole relaxation times of fresh and used oils with kinematic viscosity, with the content of additives and wear products. The desired array of relaxation time distributions has been calculated by regularization and the least squares method using the CONTIN algorithm. The calculations have been carried out in the RILT program running in the MatLab environment. It has been shown that polarization and subsequent dipole relaxation are caused by additive molecules that are triggered during engine operation. Differences in relaxation times can also be caused by the formation of associations involving dipole molecules. The data obtained in the work can be used in the future to build an expert engine diagnostics system and to determine the parameters of unknown oils.

Keywords: motor oils, dipole polarization, permittivity, relaxation.

For citation: Synashenko O. V., Sinyavsky N. Ya., Kostrikova N. A. Analysis of marine motor oils using dielectric permittivity relaxation // *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2023;(71):131-144. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-131-144

ВВЕДЕНИЕ

Моторное масло играет ключевую роль в судовых дизельных двигателях. Оно состоит из сложной смеси углеводородов и представляет собой комбинацию базового масла и набора присадок [1]. Смазочные масла в двигателях используются для уменьшения трения подвижных узлов и поддержания их чистоты,

поскольку содержат как моющие, так и диспергирующие присадки. Старение моторного масла представляет собой сложный процесс, в ходе которого происходит деградация базового масла и истощение его присадок. Основными факторами старения являются окислительная высокотемпературная деградация и загрязнение сажей, металлами износа, топливом, водой и охлаждающей жидкостью.

Существует множество физических и химических методов исследования характеристик моторного масла: спектрофотометрия, флуоресцентная спектроскопия, ИК-спектроскопия, феррография и многие другие. В статье [2] для обнаружения в моторном масле ферромагнитных частиц и определения их дисперсности применяют магнитооптический метод в совокупности с методом фотонной корреляционной спектроскопии. Это дает возможность регистрации малого содержания ферромагнитных частиц износа в масле и их дисперсности.

В работе [3] проведено исследование свежего и отработанного судового моторного масла методом высокого разрешения ^1H ЯМР и с помощью релаксометрии ядерного магнитного резонанса (ЯМР) с инверсией преобразования Лапласа. Зарегистрировано изменение молярного содержания функциональных групп CH , CH_2 и CH_3 для отработанных масел. Показано, что времена спин-спиновой релаксации протонов отработанного масла 10W40 смещаются в сторону меньших значений, а для отработанного масла M-4015 увеличиваются. Это свидетельствует об изменении подвижности функциональных групп макромолекул, вызванном изменением вязкости отработанного масла.

В статье [4] для регистрации продуктов износа применялись методы фотометрии и флуоресценции. Предложен способ определения концентрации ферромагнитных частиц посредством анализа спектров оптической плотности в зависимости от длины волны при помещении образца в постоянное магнитное поле.

В последнее время большое внимание уделяется диэлектрическим свойствам промышленных смазок [5]. Методы анализа диэлектрической проницаемости относительно быстрые, простые и недорогие. Диэлектрическая спектроскопия [6] — это аналитический метод исследования взаимодействия между диэлектрическим материалом и электромагнитной энергией в радиочастотном диапазоне. В работе [7] диэлектрическая спектроскопия использовалась для анализа процесса окисления смазочного масла двигателя в сравнении с Фурье ИК-спектроскопией.

В публикации [8] проводится сравнение минерального и углеводородного масел по проводимости и механизмам релаксации в комплексной плоскости диаграммы Коула-Коула и по диэлектрическим потерям. Здесь использован метод диэлектрической релаксационной спектроскопии в частотной области при различных значениях напряженности переменного электрического поля.

В статье [9] изучались диэлектрическая проницаемость, диэлектрические потери и изоляционные характеристики бумаги, пропитанной маслом с наночастицами оксида железа. Исследования показали, что наночастицы связаны с пропитанными бумажными волокнами O–H связями и что относительная диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери бумаги, пропитанной наножидкостью, увеличиваются. При этом электрическая прочность на пробой пропитанной наножидкостью бумаги может увеличиваться.

В публикации [10] представлена процедура подбора и компьютерный код для численной оценки диэлектрических свойств посредством функции распределения времен релаксации. Подход основан на линейном методе наименьших

квадратов. Базисный набор спектров здесь рассчитывается с использованием релаксационной модели Дебая. Метод протестирован на смоделированных спектрах с определенными параметрами диэлектрической релаксации и на некоторых экспериментальных диэлектрических спектрах.

В работе [11] приводятся результаты измерений диэлектрической проницаемости в диапазоне от микроволновых до инфракрасных частот для различных жидких электролитов и неэлектролитных систем. Продемонстрировано три вида релаксационных процессов с практически непрерывным распределением времени релаксации, включая очень короткое (около 1 пс).

Диэлектрические свойства асфальтенов, осажденных из четырех различных сортов нефти, были изучены в работе [12] в частотном диапазоне 0,01–1000 Гц с помощью спектроскопии в низкочастотной области. Показано, что увеличение агрегации асфальтенов приводит к значительному уменьшению аномального эффекта диэлектрической проницаемости на низких частотах.

В статье [13] с помощью диэлектрической спектроскопии проанализирована корреляция между степенью окисления моторного масла и его диэлектрическими характеристиками. В [14] измерены частотные характеристики трех разных видов минерального масла и выполнено сравнение с результатами моделирования по предлагаемой авторами поляризационной модели.

Исследования по анализу моторных масел, проведенные в [15], подтверждают селективность и чувствительность спектроскопии диэлектрической проницаемости, основанной на измерениях частотной зависимости действительной составляющей комплексной емкости.

Важной проблемой при эксплуатации моторных масел является деградация его компонентов, функциональных присадок, так как эксплуатационные характеристики масла зависят от концентрации активных веществ присадок.

Цель настоящей работы – исследование ряда отработанных и свежих моторных масел методом диэлектрической спектроскопии в широком частотном диапазоне, изучение распределения времен дипольной диэлектрической релаксации, обнаружение функциональных присадок, определяющих качество смазочных масел различных видов.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для экспериментальных исследований применялся современный прецизионный цифровой измеритель LCR параметров TH2827C [16]. Диапазон рабочих частот прибора – 0,02–1000 кГц. Измерительной ячейкой служил воздушный конденсатор, помещаемый в исследуемое масло. Все измерения выполнены при температуре $T = 295$ °К. Измеренные частотные зависимости диэлектрических параметров обрабатывались на компьютере.

Свежие и отработанные моторные масла являются полярными диэлектриками. Во внешнем переменном электрическом поле поляризация образца уменьшается, если время установления равновесной ориентации диполей становится больше периода колебаний электрического поля. В случае простых жидкостей поляризация спадает с одним характерным временем релаксации, и здесь уравнение Дебая для комплексной относительной диэлектрической проницаемости имеет вид [17]:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' + i\varepsilon'' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + i\omega T_r}, \quad (1)$$

где ω – круговая частота; ε_∞ – относительная диэлектрическая проницаемость при $\omega \rightarrow \infty$; ε_s – диэлектрическая проницаемость при $\omega \rightarrow 0$; T_r – время диэлектрической релаксации. Тангенс угла диэлектрических потерь для модели Дебая можно записать следующим образом:

$$tg\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega T_r}{\varepsilon + \varepsilon_\infty \omega^2 T_r^2}. \quad (2)$$

Моторное масло является сложной композицией полярных молекул и характеризуется не одним, а несколькими временами дипольной релаксации, которые относятся к разным группам молекул. Если функцию распределения диэлектрических времен релаксации обозначить как $G(T_r)$, то действительную часть диэлектрической проницаемости можно записать:

$$\varepsilon' = \int_0^\infty G(T_r) \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty \omega^2 T_r^2}{1 + \omega^2 T_r^2} dT_r. \quad (3)$$

Функция (3) описывает экспериментальную частотную зависимость относительной диэлектрической проницаемости моторного масла. Функция $G(T_r)$ распределения времен диэлектрической релаксации позволит получать информацию о составе присадок в масле, частицах износа, загрязняющих примесей и химической деградации масла.

Процедуру нахождения распределения дипольных времен релаксации иллюстрирует рис. 1. Для получения спектра времен релаксации $G(T_r)$ нужно к применить инверсию интегрального преобразования (ИТ) к выражению (3). Для инверсии в работе применяется алгоритм [18] и программа RILT [19], работающая в среде MatLab. Искомый массив $G(T_r)$ рассчитывается с помощью регуляризации методом наименьших квадратов по алгоритму CONTIN [18].

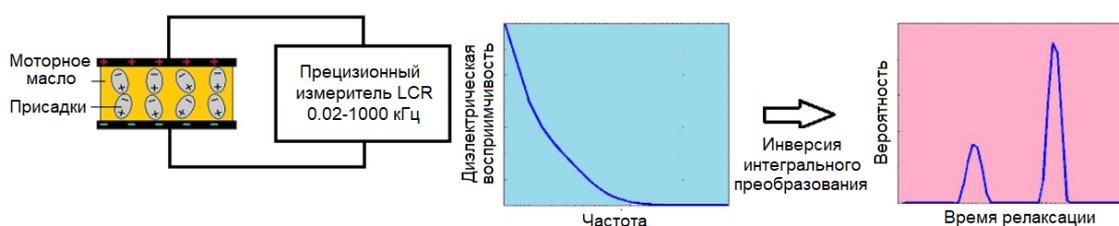


Рис. 1. Схема нахождения распределения времен релаксации
 Fig. 1. Scheme for obtaining the relaxation times distribution

Для контроля вязкости моторных масел применялся капиллярный вискозиметр обратного тока ВНЖ 1.41 ЭКРОС с диаметром капилляра $d = 1,41$ мм. Измерения вязкости свежих и отработанных моторных масел проводились при комнатной температуре ($t = 23$ °С), полученные данные приведены в таблице, где также представлены значения вязкости для исследуемых масел при температурах 40 °С и 100 °С, заданные производителями [20–26].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Диэлектрическая проницаемость дает информацию о наличии загрязнений и состоянии пакета присадок к маслу. При измерении диэлектрической проницаемости отработанного смазочного масла изменения его диэлектрической проницаемости могут указывать на присутствие загрязняющих веществ, таких как вода, топливо или частицы износа, на окисление масла или истощение присадок. Любое увеличение диэлектрической проницаемости указывает на наличие какого-либо загрязнения или изменение химического состава масла. В работе [27] на модельных образцах были получены зависимости диэлектрической проницаемости от количества частиц износа алюминия и железа в виде следующих уравнений:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 0.0031 \cdot X_{Al} + 2.4049, \\ \varepsilon &= 0.0004 \cdot X_{Fe} + 2.4036, \end{aligned} \quad (4)$$

где X_{Al} – концентрация алюминия в ppm; X_{Fe} – концентрация железа в ppm. С повышением температуры плотность масла уменьшается, следовательно, и диэлектрическая проницаемость масла тоже уменьшается.

Моторные масла представляют собой сложные композиции углеводородов. Их относительная диэлектрическая проницаемость лежит в пределах от 2,1 до 2,4 и зависит от вязкости, плотности масла, содержания в нем парафиновых, нафтеновых и ароматических соединений и пакета присадок. Наличие присадок повышает диэлектрическую проницаемость масла, т. к. сами присадки имеют более высокую диэлектрическую проницаемость. Диэлектрические характеристики моторных масел коррелируют с вязкостными характеристиками [17].

Основные диэлектрические характеристики при температуре $T = 295$ °К в начале и конце частотного диапазона LCR TH2827C для исследованных масел приведены в публикации [28]. Можно обнаружить корреляцию между этими характеристиками и кинематическими вязкостями (таблица).

Таблица. Измеренные значения вязкости свежих и отработанных моторных масел
 Table. Measured viscosity values of fresh and used motor oils

№ п/п	Наименование масла	Кинематическая вязкость ν , мм ² /с		
		$t = 23$ °C	$t = 40$ °C	$t = 100$ °C
1	Shell Rimula 15W40			
	свежее	285,9	109,0 [20]	14,7 [20]
	отработанное 250 ч	109,2	–	–
	отработанное 500 ч	253,3	–	–
2	Mobil 5W30			
	свежее	157,1	60,7 [21]	10,3 [21]
	отработанное 170 ч	176,3	–	–
3	Mobil 5W40			
	свежее	171,8	79,0 [22]	13,2 [22]
	отработанное 160 ч	140,2	–	–

4	Mobil 10W40			
	свежее	318,8	89,3 [23]	13,3 [23]
	отработанное 300 ч	270,2	–	–
5	Total Disola M 4015			
	Свежее	420,8	145,0 [24]	14,2 [24]
	отработанное 300 ч	311,9	–	–
6	Navigo ТРЕО 12/40			
	свежее	360,8	–	14,5 [25]
	отработанное 300 ч	626,2	–	–
7	Масло базовое SN-150	75,3	30,0–31,5 [26]	5,0–5,5 [26]
8	Масло базовое SN-500	264,4	97,5–102,0[26]	10,5–11,5 [26]

Релаксация диэлектрической проницаемости свежих и отработанных масел вызвана устанавливающейся ориентацией полярных молекул присадок. Как следует из частотных зависимостей ϵ для базовых масел SN-150 и SN-500, у них дипольная поляризация в исследованном диапазоне частот практически отсутствует (рис. 2). Среди свежих масел при $f = 1$ МГц самая большая диэлектрическая проницаемость ($\epsilon = 2,2596$) у масла ТРЕО 12/40, а самая низкая ($\epsilon = 2,1275$) – у масла Mobil 5W40. На частоте вплоть до $f = 1$ МГц для всех исследованных масел другие виды поляризации (ионная, электронная) не проявляются.

Зависимости диэлектрической проницаемости от частоты для базовых масел SN-150 и SN-500, свежего и отработанного 300 часов моторного масла Total Disola показаны на рис. 2.

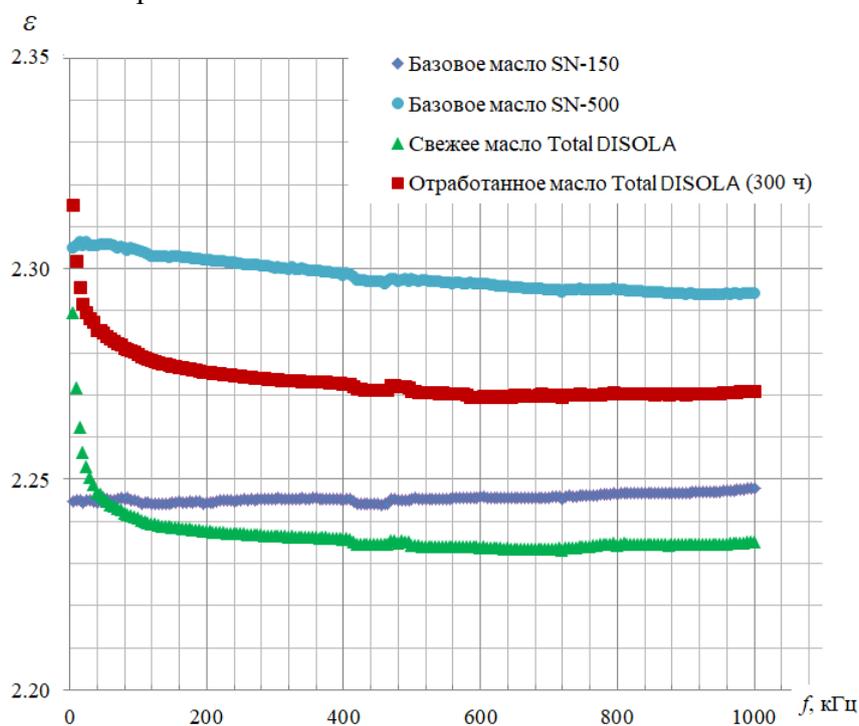


Рис. 2. Зависимости относительной диэлектрической проницаемости от частоты
 Fig. 2. Dependences of the dielectric permittivity on frequency

Как видно из графика, базовое масло, не содержащее пакета присадок, практически не имеет диполей, которые могли бы релаксировать. Диполи, вызывающие поляризацию и последующую релаксацию, – это молекулы присадок, которые в процессе работы двигателя срабатываются. Это же иллюстрируют и зависимости тангенса угла потерь для этих масел, показанные на рис. 3.

Моторные масла состоят из базового масла и системы присадок для улучшения эксплуатационных свойств масла. Распределение зарядов у молекул базовых масел является практически равномерным, и они не имеют дипольных моментов. В результате тангенс угла потерь и диэлектрическая проницаемость базовых масел SN-150 и SN-500 в исследованном диапазоне практически не зависят от частоты. Из эксперимента и литературных данных следует, что при отработке моторного масла в двигателе его диэлектрическая проницаемость увеличивается. Это связано с появлением в масле частиц износа металлов, с загрязнениями и окислением углеводородов.

Для получения необходимых свойств в масла добавляют металлосодержащие присадки, количество которых влияет на величину диэлектрической проницаемости и скорость ее релаксации.

Результаты инверсии интегрального преобразования (3) в виде функций распределения времен релаксации $G(T_r)$ приведены для свежих и отработанных масел на рис. 4. Распределения времен релаксации для свежих масел Total M4015 и Shell Rimula имеют сложный многомодальный характер (кривые 1а и 2а на рис. 4).

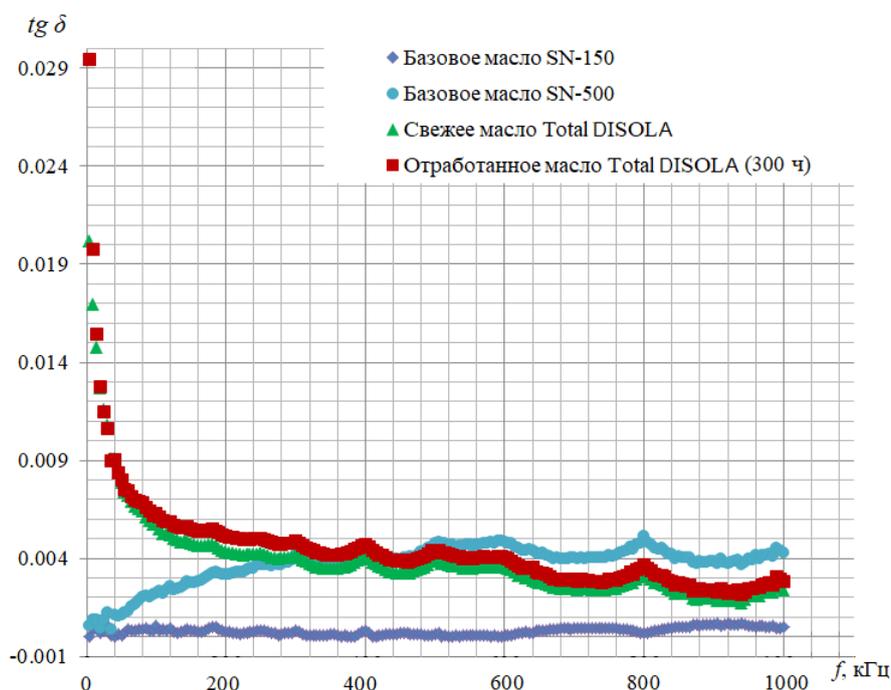


Рис. 3. Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от частоты
Fig. 3. Dependence of the tangent of dielectric loss angle on frequency

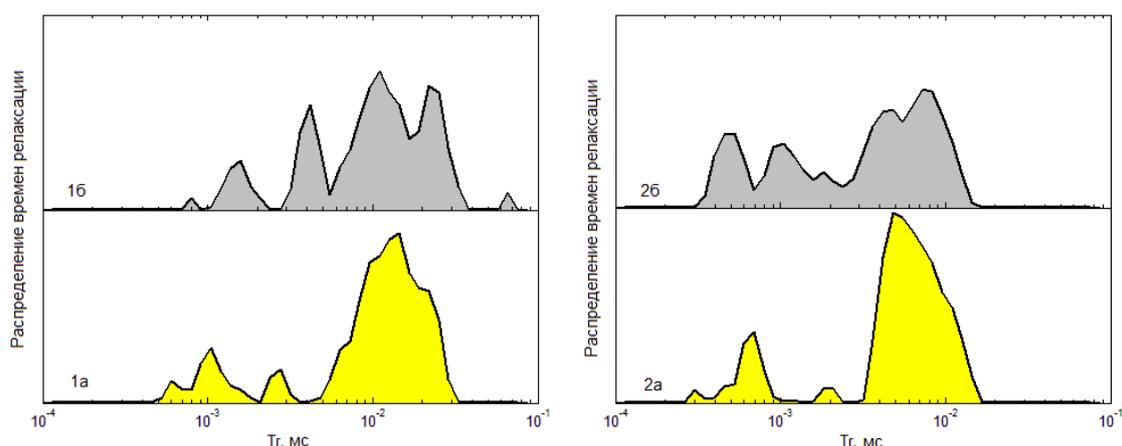


Рис. 4. Спектры времен релаксации диэлектрической проницаемости свежих и отработанных масел Shell Rimula (1a и 1б) и Total Disola M4015 (2a и 2б)

Fig. 4. Spectra of relaxation times of the dielectric constant of fresh and used oils Shell Rimula (1a and 1b) and Total Disola M4015 (2a and 2b)

У масла Shell Rimula максимальный пик в области 0,015 мс обусловлен, вероятно, диполями основной противоизносной, противозадирной и антиоксидантной присадки диалкилдитиофосфата цинка (ZDDP). Эта противоизносная присадка присутствует в настоящее время практически во всех моторных маслах. О количестве металлосодержащих присадок, в том числе цинка диалкилдитиофосфата, можно судить по величине сульфатной зольности – одному из главных параметров свежего масла. Значение ϵ и сульфатной золы некоторых масел приведены для сравнения в [29]. Наиболее интенсивный пик у масла Total M4015 находится в районе $5 \cdot 10^{-3}$ мс и обусловлен, скорее всего, другой присадкой. Положения пиков на спектрах $G(T_r)$ в отработанных маслах меняются незначительно по сравнению со свежими маслами. В отработанных маслах Total M4015 и Shell Rimula форма распределения времен релаксации меняется, что обусловлено продуктами термического разложения углеводородов. Значительное повышение содержания фосфора, цинка и бора [30] в отработанном масле Total M4015 вызвано, по-видимому, загрязнением отработанного масла топливом, содержащим противоизносные присадки.

Распределения времен диэлектрической релаксации для масел Mobil 5W30 и Mobil 5W40 получаются близкими друг к другу. Состав углеводородов этих масел одинаков, но масло Mobil 5W30 имеет более высокую степень очистки и меньшую вязкость по сравнению с маслом Mobil 5W40. В отработанном масле Mobil 5W30 много загрязняющей примеси калия [30], пик с коротким временем релаксации сдвигается в область коротких времен, очевидно, из-за уменьшения вязкости. Калий в отработанных маслах может появляться от присадок в топливо или от антифриза, содержащего присадки на основе калия.

Отличительной особенностью спектров времен релаксации для масел Mobil 15W40 и Rimula 15W40 является то, что основной пик почти на порядок больше, чем для других исследованных масел. В остальном вид спектров подобен друг другу. В масле Rimula 15W40, по данным [30], самое высокое содержа-

ние бора (290 ppm). Бор во многих моторных маслах содержится в диспергирующих присадках. Есть бор и в противоизносной присадке нитрита бора. В свежем масле Rimula 15W40 довольно значительное содержание молибдена [30], а он имеется в дитиокарбамате молибдена (MoDTC), противоизносной присадке, эффективном модификаторе трения. Пики времен релаксации для исследованных масел могут быть обусловлены вышеупомянутыми присадками. Малые значения времен релаксации связаны с диполями малых молекулярных групп, например, высокоподвижными хвостами макромолекул, большие значения времен релаксации вызваны движением больших молекул, как целых. Различия во временах релаксации могут быть вызваны также образованием ассоциаций, включающих дипольные молекулы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе использован новый подход анализа зависимости диэлектрической проницаемости моторных масел от частоты для нахождения распределения времен дипольной релаксации. Искомый массив распределения времен релаксации рассчитывается с помощью регуляризации методом наименьших квадратов. Метод использует релаксационную модель Дебая, но может применяться и для других моделей. Процедура предварительно протестирована на смоделированных спектрах с известными параметрами диэлектрической релаксации и на реальных диэлектрических спектрах моторных масел, она оказалась надежной и достаточно устойчивой. Спектры диэлектрических времен релаксации являются предпосылкой для интерпретации процессов в моторных маслах на молекулярном уровне. Важная информация, недоступная с помощью других методов, может быть получена и использована для объяснения свойств растворов или смесей растворов.

Список источников

1. Моторные масла / Р. Балтенас [и др.]. М., СПб.: АльфаЛаб, 2000. 272 с.
2. Sinyavsky N. Ya., Ivanov A. M., Kostrikova N. A. Analysis of wear particles in used marine engine oils // Marine intellectual technologies. 2021. N 4 (4). P. 44–48.
3. Sinyavsky N., Mershev I. NMR relaxometry used ship oils // Journal of Eta Maritime Science. 2022. V. 10 (3). P. 195–201.
4. Korneva I. P., Sinyavsky N. Ya., Kostrikova N. A. Study of marine motor oils with wear products by optical methods // Marine intellectual technologies. 2022. N 4 (3). P. 72–78.
5. Guan L., Feng X. L., Xiong G. Engine lubricating oil classification by SAE grade and source based on dielectric spectroscopy data // Analytica Chimica Acta. 2008. V. 628. Is. 1. P. 117–120.
6. Kremer F., Schönhals A. (eds). Broadband Dielectric Spectroscopy. Berlin: Springer-Verlag Heidelberg GmbH, 2012.
7. Application of dielectric spectroscopy for engine lubricating oil degradation monitoring / L. Guan, X. L. Feng, G. Xiong, J. A. Xie // Sensors and Actuators A: Physical. 2011. V. 168. Is. 1. P. 22–29.

8. Dielectric Properties of Electrical Insulating Liquids for High Voltage Electric Devices in a Time-Varying Electric Field / Peter Havran [et al.] // *Energies*. 2022. N 15. P. 391.
9. The Effect of Fe₃O₄ Nanoparticle Size on Electrical Properties of Nanofluid Impregnated Paper and Trapping Analysis / Bin Du, Qian Liu, Yu Shi, Yushun Zhao // *Molecules*. 2020. N 25. P. 3566.
10. Zasetsky A. Y., Buchner R. Quasi-linear least squares and computer code for numerical evaluation of relaxation time distribution from broadband dielectric spectra // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2011. N 23. P. 025903.
11. Barthel J., Buchner R. High frequency permittivity and its use in the investigation of solution properties // *Pure & App. Chem*. 1991. V. 63. N 10. P. 1473–1482.
12. Dielectric Properties of Crude Oil Components / H. Vralstadet [et al.] // *Energy Fuels*. 2009. N 23. P. 5596–5602.
13. Dielectric submicroscopic phase characterisation of engine oil dispersed in jet fuel based on on-line dielectric spectroscopy /Ying-zhong Gong [et al.] // *Lubrication Science*. 2017. V. 29. Is. 5. P. 335–354.
14. Study of the dielectric response in mineral oil using frequency-domain measurement /Yuan Zhouet [et al.] // *Journal of Applied Physics*. 2014. N 115. P. 124105.
15. Levi D., Stoynov Z., Vladikova D. Application of permittivity spectroscopy for screening of motor oils lubricating properties // *Bulgarian Chemical Communications*. 2017. V. 49. Sp. is. C. P. 254–259.
16. TH2826/A High Frequency LCR-Meter. Operationmanual. URL: http://222.185.248.92:8080/upload/UploadAction2/20200114135540_522.pdf (дата обращения: 01.04.2023).
17. Гусев Ю. А. Основы диэлектрической спектроскопии. Казань: КГУ, 2008. 112 с.
18. Provencher S. W. A constrained regularization method for inverting data represented by linear algebraic or integral equations // *Computer Physics Communications*. 1982. V. 27 (3). P. 213–227.
19. Marino I.-G. Regularized Inverse Laplace Transform, 2004. URL: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/6523-rilt/content/rilt.m> (дата обращения: 26.06.2022).
20. Моторное масло Shell вязкостью 15W-40 – характеристики. URL: https://www.shell-moscow.ru/catalog/viscosity_15w-40/ (дата обращения: 08.10.2023).
21. Mobil 1™x15W-30. URL: <https://www.mobil.com/ru-ru/passenger-vehicle-lube/pds/eu-xx-mobil-1-x1-5w-30> (дата обращения: 08.10.2023).
22. Mobil Super™ 3000 X1 5W-40. URL: <https://www.mobil.com/en/ru-mdm/passenger-vehicle-lube/pds/eu-xx-mobil-super-3000-x1-5w-40> (дата обращения: 08.10.2023).
23. MOBIL™ 10W40. URL: <https://www.mobil.com/en/ru-ua/passenger-vehicle-lube/pds/eu-xx-mobil-10w-40> (дата обращения: 08.10.2023).
24. Total Disola M 4015 – моторное масло для высоко- и среднеоборотных дизелей судов. URL: <https://interoil-spb.ru/product/motornoe-maslo-total-disola-m-4015/> (дата обращения: 08.10.2023).

25. Navigo ТРЕО 12/40. URL: <http://www.fareastfish.ru/oil/trunk/navigo-tpeo-12-40.html> (дата обращения: 08.10.2023).
26. Базовые масла. URL: <https://danalubes.ru/products/base-oils> (дата обращения: 08.10.2023).
27. Григоров А. Б., Наглюк И. С. Рациональное использование моторных масел: монография. Харьков: Точка, 2013. 178 с.
28. Ковалишин Ф. П. Исследование релаксации электрических параметров отработанного моторного масла // Вестник молодежной науки. 2023. № 2 (39). С. 1–7.
29. Григоров А. Б., Карножицкий П. В., Наглюк И. С. Изменение диэлектрической проницаемости дизельных моторных масел в эксплуатации // Автомобильный транспорт. 2007. № 20. С. 3.
30. Sinyavsky N., Kostrikova N., Analysis of the marine engine oils elemental constituents for engine diagnostics, 2023 (in print).

References

1. Baltenas R. [et al.]. *Motornye masla* [Motor oils]. Moscow, Saint-Petersburg, Al'faLab. 2000, 272 p.
2. Sinyavsky N. Ya., Ivanov A. M., Kostrikova N. A. Analysis of wear particles in used marine engine oils. *Marine intellectual technologies*. 2021, no. 4 (4), pp. 44–48.
3. Sinyavsky N., Mershev I. NMR relaxometry used ship oils. *Journal of Eta Maritime Science*. 2022, vol. 10 (3), pp. 195–201.
4. Korneva I. P., Sinyavsky N. Ya., Kostrikova N. A. Study of marine motor oils with wear products by optical methods. *Marine intellectual technologies*. 2022, no. 4 (3), pp. 72–78.
5. Guan L., Feng X.L., Xiong G. Engine lubricating oil classification by SAE grade and source based on dielectric spectroscopy data. *Analytica Chimica Acta*. 2008, vol. 628, is.1, pp. 117–120.
6. Kremer F., Schönhals A. (eds). *Broadband Dielectric Spectroscopy*. Berlin, Springer-Verlag Heidelberg GmbH, 2012.
7. Guan L., Feng X. L., Xiong G., Xie J. A. Application of dielectric spectroscopy for engine lubricating oil degradation monitoring. *Sensors and Actuators A: Physiscal*. 2011, vol. 168, is. 1, pp. 22–29.
8. Peter Havran [et al.]. Dielectric Properties of Electrical Insulating Liquids for High Voltage Electric Devices in a Time-Varying Electric Field. *Energies*. 2022, no. 15, p. 391.
9. Bin Du, Qian Liu, Yu Shi, Yushun Zhao. The Effect of Fe₃O₄ Nanoparticle Size on Electrical Properties of Nanofluid Impregnated Paper and Trapping Analysis. *Molecules*. 2020, no. 25, p. 3566.
10. Zasetsky A. Y., Buchner R. Quasi-linear least squares and computer code for numerical evaluation of relaxation time distribution from broadband dielectric spectra. *J. Phys.: Condens. Matter*. 2011, no. 23, p. 025903.
11. Barthel J., Buchner R. High frequency permittivity and its use in the investigation of solution properties. *Pure & App. Chem*. 1991, vol. 63, no. 10, pp. 1473–1482.
12. Vralstad H. [et al.]. Dielectric Properties of Crude Oil Components. *Energy Fuels*. 2009, no. 23, pp. 5596–5602.

13. Ying-zhong Gong [et al.]. Dielectric submicroscopic phase characterisation of engine oil dispersed in jet fuel based on on-line dielectric spectroscopy. *Lubrication Science*. 2017, vol. 29, is. 5, pp. 335–354.
14. Yuan Zhou [et al.]. Study of the dielectric response in mineral oil using frequency-domain measurement. *Journal of Applied Physics*. 2014, no. 115, p. 124105.
15. Levi D., Stoynov Z., Vladikova D. Application of permittivity spectroscopy for screening of motor oils lubricating properties. *Bulgarian Chemical Communications*. 2017, vol. 49, sp. is. C, pp. 254–259.
16. TH2826/A High Frequency LCR-Meter. Operation manual [online]. Available at: http://222.185.248.92:8080/upload/UploadAction2/20200114135540_522.pdf (Accessed 1 April 2023).
17. Gusev Yu. A. *Osnovy dielektricheskoy spektroskopii* [Fundamentals of dielectric spectroscopy]. Kazan', KGU, 2008, 112 p.
18. Provencher S. W. A constrained regularization method for inverting data represented by linear algebraic or integral equations. *Computer Physics Communications*. 1982, vol. 27 (3), pp. 213–227.
19. Marino I.-G. Regularized Inverse Laplace Transform, 2004. Available at: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/6523-rilt/content/rilt.m> (Accessed 26 June 2022).
20. *Motornoe maslo Shell vyazkost'yu 15W-40 – kharakteristiki* [Shell engine oil viscosity 15W-40]. Available at: https://www.shell-moscow.ru/catalog/viscosity_15w-40/ (Accessed 8 October 2023).
21. Mobil 1™x15W-30. Available at: <https://www.mobil.com/ru-ru/passenger-vehicle-lube/pds/eu-xx-mobil-1-x1-5w-30> (Accessed 8 October 2023).
22. Mobil Super™ 3000 X1 5W-40. Available at: <https://www.mobil.com/en/ru-mda/passenger-vehicle-lube/pds/eu-xx-mobil-super-3000-x1-5w-40> (Accessed 8 October 2023).
23. MOBIL™ 10W40. Available at: <https://www.mobil.com/en/ru-ua/passenger-vehicle-lube/pds/eu-xx-mobil-10w-40> (Accessed 8 October 2023).
24. *Total Disola M 4015 – motornoe maslo dlya vysoko- i sredneoborotnykh dizeley sudov* [Total Disola M 4015 – motor oil for high and medium speed diesel ships]. Available at: <https://interoil-spb.ru/product/motornoe-maslo-total-disola-m-4015/> (Accessed 8 October 2023).
25. Navigo TPEO 12/40. Available at: <http://www.fareastfish.ru/oil/trunk/navigo-tpeo-12-40.html> (Accessed 8 October 2023).
26. *Bazovye masla* [Base oils]. Available at: <https://danalubes.ru/products/base-oils> (Accessed 8 October 2023).
27. Grigorov A. B., Naglyuk I. S. *Ratsional'noe ispol'zovanie motornykh masel* [Rational use of motor oils]. Kharkov, Tochka. 2013, 178 p.
28. Kovalishin F. P. Issledovanie relaksatsii elektricheskikh parametrov otrabotannogo motornogo masla [Study of relaxation of electrical parameters of used engine oil]. *Vestnik molodezhnoy nauki*. 2023, no. 2 (39), pp. 1–7.
29. Grigorov A. B., Karnozhitskiy P. V., Naglyuk I. S. Izmenenie dielektricheskoy pronitsaemosti dizel'nykh motornykh masel v ekspluatatsii [Change of dielectric permittivity of diesel engine oils in operation]. *Avtomobil'nyy transport*. 2007, no. 20, p. 3.

30. Sinyavsky N., Kostrikova N. Analysis of the marine engine oils elemental constituents for engine diagnostics, 2023 (in print)

Информация об авторах

О. В. Сынашенко – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики

Н. Я. Сinyaвский – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики

Н. А. Кострикова – кандидат физико-математических наук, доцент, проректор по научной работе

Information about the authors

O. V. Synashenko – PhD in Physical and Mathematical sciences, Associate Professor of the Department of Physics

N. Ya. Sinyavsky – Doctor of Physical and Mathematical sciences, Professor, Head of the Department of Physics

N. A. Kostrikova – PhD in Physical and Mathematical sciences, Associate Professor, Vice-rector for Research

Статья поступила в редакцию 09.10.2023; одобрена после рецензирования 19.10.2023; принята к публикации 20.10.2023.

The article was submitted 09.10.2023; approved after reviewing 19.10.2023; accept for publication 20.10.2023.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья

УДК 551.799 (261.24) + 502.656

DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-147-158

**Многолетняя динамика состава верхнего слоя донных отложений
в неглубоком водоеме лагунного типа (на примере Калининградского залива
Балтийского моря)**

Владимир Андреевич Чечко¹, Виктория Юрьевна Топчая²

^{1,2} Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

¹ che-chko@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3030-1165>

² piwis@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9724-0013>

Аннотация. Вислинский залив – второй по величине мелководный бассейн лагунного типа Балтийского моря, расположенный в его юго-восточной части. Это трансграничный водный объект общей площадью 838 км², северо-восточная часть которого (510 км²) находится под юрисдикцией России и именуется Калининградским заливом, а юго-западная (328 км²) – под юрисдикцией Польши. От моря он отделяется устойчивым песчаным барьером, водообмен с морем осуществляется через судоходный Балтийский пролив. Калининградский залив – объект множественного хозяйственного использования, который испытывает большую антропогенную нагрузку. В работе сопоставлены результаты granulometric parameters донных осадков, отобранных в Калининградском заливе с поверхностного слоя (0–7 см) на одних и тех же точках с промежутком в 29 лет. Исследования показали, что донные отложения залива в 1993 г. были представлены песками, песками илистыми, илами песчанистыми, илами и глинистыми илами. К настоящему времени произошли изменения в составе фракций, но типы осадков на контрольных точках не изменились. В 1993 г. доля песчаных частиц в песчаных отложениях составляла в среднем 72 %, а в 2021 г. – 78 %. В илах содержание песка увеличилось с 17 до 23 %, а в глинистых илах – с 3 до 7 %. Что касается илистых частиц, то их доля в песчаной фракции за 29 лет снизилась в среднем на 6 %, в илах – на 2 %, а в глинистых илах – на 4 %. Величина изменений, произошедших в составе осадков за указанный период, неодинакова и зависит от типов осадков. Особенность современного осадконакопления в заливе – регулярное взмучивание верхнего слоя донных отложений, сопровождающееся переотложением осадочных компонентов и транспортировкой мелких частиц во взвешенном состоянии в акваторию моря.

Ключевые слова: Калининградский залив, осадконакопление, ветроволновое взмучивание, литологические типы отложений, песок, глинистый ил.

Благодарности: авторы выражают благодарность Бабакову Александру Николаевичу за помощь в сборе фактического материала и замечания при подготовке статьи.

Финансирование: работа выполнена при поддержке госзадания ИОРАН (тема № FMWE-2021-0012).

Для цитирования: Чечко В. А., Топчая В. Ю. Многолетняя динамика состава верхнего слоя донных отложений в неглубоком водоеме лагунного типа (на примере Калининградского залива Балтийского моря) // Известия КГТУ. 2023. № 71. С. 147-158. DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-147-158

Long-term dynamics of the composition of the upper layer of bottom sediments in a shallow lagoon-type basin (the example of Kaliningrad Bay in the Baltic Sea)

Vladimir A. Chechko¹, Viktoriya Yu. Topchaya²

^{1,2}, Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹ che-chko@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3030-1165>

² piwis@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9724-0013>

Abstract. The Vistula Lagoon is the second largest shallow lagoon-type basin of the Baltic Sea, located in its southeastern part. This is a transboundary water body with a total area of 838 km², the northeastern part of which (510 km²) is under the jurisdiction of Russia and is called the Kaliningrad Bay, and the southwestern part (328 km²) is under the jurisdiction of Poland. It is separated from the sea by a stable sand barrier, and water exchange with the sea is carried out through the navigable Baltic Strait. The Kaliningrad Bay is an object of plural economic use and is experiencing a large anthropogenic load. The article compares the results of grain size parameters of bottom sediments sampled in the Kaliningrad Bay from the surface layer (0–7 cm) at the same points with an interval of 29 years. Studies have shown that the bottom sediments of the bay in 1993 year were represented by sands, silty sands, sandy silts, silts and clayey silts. To date, there have been changes in the composition of the fractions, but the types of precipitation at the control points have not changed. In 1993 year the proportion of sand particles in sand deposits averaged 72% and in 2021 year – 78%. In the silts the sand content increased from 17 to 23%, and in clayey silts from 3 to 7%. As for silt particles their share in the sandy fraction over 28 years decreased by an average of 6%, in silts by 2%, and in clayey silts by 4%. The value of the changes that occurred in the composition of sediments over the specified period is not the same and depends on the types of sediments. A feature of modern sedimentation in the bay is regular resuspension of the upper layer of bottom sediments, accompanied by redeposition of sedimentary components and partial transportation of fine particles in suspension to the sea.

Keywords: Kaliningrad Bay, sedimentation, wind-wave resuspension, lithologic sediment types, sand, clayey silt.

Acknowledgments: The authors are grateful to Aleksander Babakov for his help in collecting the material and for comments during the preparation of the article.

Funding: The work has been supported by the IORAN government assignment (subject № FMWE-2021-0012).

For citation: Chechko V. A., Topchaya V. Yu. Long-term dynamics of the composition of the upper layer of bottom sediments in a shallow lagoon-type basin (the example of Kaliningrad Bay in the Baltic Sea) // *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2023;(71):147-158. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-147-158

ВВЕДЕНИЕ

На состояние обстановки осадконакопления водных бассейнов лагунного типа оказывает влияние ряд естественных и антропогенных факторов. Речной сток, береговая абразия и эоловый перенос – основные источники седиментационных веществ [1]. В то же время, в формировании количественного и вещественного состава водной взвеси помимо природных факторов значительную роль играют и антропогенные – судоходство, дноуглубительные работы и разработка нерудных полезных ископаемых. В неглубоких водоемах состав и распределение донных осадков в поверхностном слое во многом регулируется ветро-волновой нагрузкой [2, 3] и периодическими сгонно-нагонными процессами [4]. Лагуны, расположенные в береговой зоне моря, испытывают возрастающее антропогенное воздействие в связи с их хозяйственной и рекреационной привлекательностью.

Вислинский залив (лагуна) находится в береговой зоне юго-восточной части Балтийского моря. Он характеризуется малыми глубинами (средняя глубина составляет 2,7 м), регулярными проникновениями морских вод через пролив возле г. Балтийска и серьезным вовлечением его акватории в различные виды хозяйственной деятельности. Специфика залива заключается в трансграничности – его северо-восточная часть относится к России (Калининградский залив), а юго-западная – к Польше [5]. Отношение к естественному потенциалу залива как к единому целому предполагает наличие общих проблем, обусловленных совместным использованием его акватории.

Активная компонента седиментационной системы – донные осадки (ДО), состояние которых является отражением изменений, происходящих в водной экосистеме и окружающей среде. Они являются источником информации об условиях и особенностях осадконакопления, существовавших в историческом прошлом [6]. Состав и физико-химические свойства обуславливают важнейшую экологическую функцию ДО в водоеме – участие в процессах загрязнения и очищения водной среды. При этом отдельного внимания заслуживают современные сведения о распределении основных типов ДО, динамике, гранулометрическом и химическом составе их верхнего слоя, играющего определяющую роль в протекании физико-химических процессов в контактной зоне «вода–дно». Осадочные частицы верхнего слоя, как правило, слабо уплотнены, поэтому легко переходят во взвешенное состояние и могут служить источником вторичного загрязнения водной среды [7].

Особый интерес представляет комплексное изучение ДО неглубоких водоемов (прибрежных заливов, лагун, эстуариев), испытывающих повышенную антропогенную нагрузку. На небольших глубинах под воздействием ветровых волн возникает регулярная дестабилизация верхнего слоя ДО и их взмучивание. Гидродинамическая активность водных масс приводит к удержанию их в толще воды и транспортировке. Учитывая, что осадочные частицы могут сорбировать разные

загрязнители, следствием такого процесса может быть вторичное загрязнение водной среды. Наибольшей сорбционной способностью и поглотительной емкостью обладают мелкодисперсные илистые частицы. Известно [8], что именно они интенсивно сорбируют и переносят тяжелые металлы, радионуклиды, продукты распада нефти и нефтепродуктов. В связи с этим актуальным становится выяснение особенностей пространственного распределения гранулометрических типов ДО и мест локализации илистых отложений, определение многолетних изменений в составе ДО с акцентом на динамике илистых частиц в составе ДО.

Цель работы – выявить многолетние изменения в гранулометрическом составе верхнего слоя ДО Калининградского залива Балтийского моря.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Фактический материал для изучения верхнего (0–7 см) слоя отложений был собран в 1993 и 2021 гг. на станциях, равномерно охватывающих всю акваторию залива (рис. 1). Для этого использовался известный пробоотборник ДО Петерсена. Первичная обработка полученных проб выполнялась непосредственно на борту экспедиционного судна по принятым в морских геологических исследованиях правилам. Гранулометрический состав ДО определялся по общему содержанию частиц различной крупности в процентах от массы исследуемой пробы. При этом для выделения фракций более 0,04 мм применялся ситовой метод, а для фракций менее 0,04 мм – водно-механический вид анализа [9].

Используя данные гранулометрического анализа, а также классификацию обломочных частиц Вентворта [10], для каждой из точек были выделены пять типов ДО – от песков до глинистых илов. Графическим методом [11] определены медианный диаметр частиц (M_d) и коэффициент сортировки (S_o). Если он не превышал 2 ($S_o < 2$), то осадки считались хорошо сортированными, при значении коэффициента от 2 до 3 – средне сортированными, а при коэффициенте более 3 ($S_o > 3$) осадки были отнесены к плохо сортированным.

Согласно [12], в акватории Калининградского залива по морфологическим, гидродинамическим и литологическим особенностям выделено несколько седиментационных районов. Исследования проводились в двух районах – эстуарии р. Преголи и юго-западном – как наиболее обширных по занимаемой территории и характеризующихся разнородным спектром гранулометрических типов осадков. К эстуарию р. Преголи относится восточная часть залива, находящаяся под воздействием стока одноименной реки. Это преимущественно аккумулятивная зона, в которой значительные площади дна заняты разнозернистыми и илистыми песками, а также ракушняками. Для выявления изменений в составе ДО, произошедших за 29 лет в этом седиментационном районе, были сопоставлены результаты гранулометрического анализа 20 проб, отобранных в одних и тех же точках в 1993 и 2021 гг. (рис. 1).

Некоторые из результатов гранулометрического анализа представлены в табл. 1. Осадки восточной части залива, изученные в 1993 г., состояли преимущественно из крупных илистых (0,063–0,04 мм) и очень мелких (0,125–0,063 мм) песчаных частиц. Основными примесями служили мелкие пески (0,25–0,125) и илистые частицы (< 0,04 мм). В осадках, отобранных в 2021 г., были выявлены изменения гранулометрических параметров.

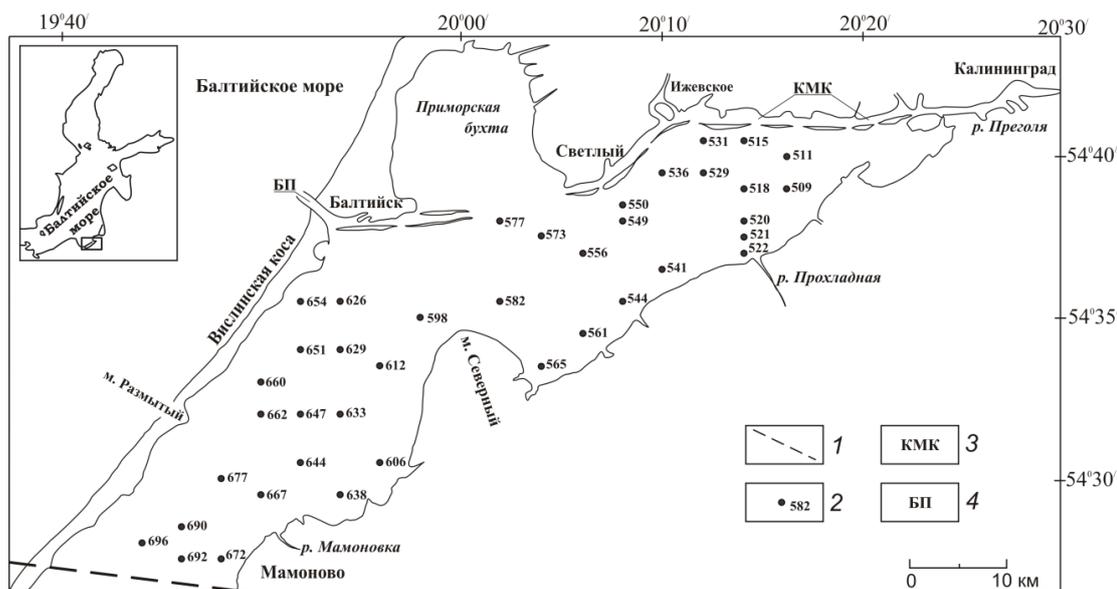


Рис. 1. Расположение точек отбора образцов ДО в Калининградском заливе:
 1 – государственная граница; 2 – точки отбора образцов ДО и их индекс;
 3 – Калининградский морской канал; 4 – Балтийский пролив
 Fig. 1. The scheme of the study area: 1 – state border; 2 – sampling points;
 3 – Kaliningrad Seaway Canal; 4 – the Strait of Baltiysk

Таблица 1. Гранулометрический состав ДО, отобранных в 1993 и 2021 гг.
 Table 1. Grain size composition of bottom sediments collected in 1993 and 2021 years

Станция №	Год	Глубина, м	Содержание фракций (мм), %							Md	S ₀
			>1,0	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,125	0,125–0,063	0,063–0,04	<0,04		
511	2021	3,1	0,0	0,0	0,0	4,5	22,0	59,0	14,5	0,06	1,2
	1993		0,0	0,0	0,0	2,2	19,0	62,3	16,8	0,05	1,2
520	2021	3,1	0,0	0,5	14,5	7,0	29,0	36,0	13,0	0,06	1,6
	1993		0,0	0,0	9,5	4,4	16,0	49,5	20,6	0,05	1,2
521	2021	2,4	39,0	32,0	2,2	8,0	17,3	1,0	0,0	0,81	3,0
	1993		28,5	24,5	1,0	5,4	30,0	10,3	0,0	0,52	3,9
522	2021	1,5	0,1	4,8	32,3	38,2	23,7	0,1	0,0	0,22	1,7
	1993		0,0	1,5	22,4	25,7	45,4	5,0	0,0	0,12	1,7
531	2021	3,0	6,0	7,5	12,5	13,0	34,5	25,5	0,8	0,1	2,2
	1993		1,5	2,4	5,0	10,2	19,2	45,6	16,2	0,06	1,7
541	2021	1,5	0,3	3,5	37,2	58,0	0,3	0,0	0,0	0,19	1,6
	1993		0,0	1,5	22,4	54,6	14,5	4,2	2,5	0,17	1,4
644	2021	4,3	0,0	0,0	0,5	11,5	25,5	54,0	9,0	0,06	1,3
	1993		0,0	0,0	0,5	7,5	23,5	56,0	12,5	0,06	1,3

647	2021	4,5	0,0	0,0	0,0	3,0	17,5	65,5	14,0	0,05	1,3
	1993		0,0	0,0	0,0	2,0	15,5	63,5	19,0	0,05	1,3
654	2021	2,8	0,5	2,0	12,5	32,5	39,5	13,0	0,0	0,12	1,4
	1993		0,5	2,0	8,5	25,0	37,5	25,0	1,5	0,09	1,4
672	2021	3,1	0,0	2,0	28,5	19,0	12,0	36,5	2,0	0,08	1,5
	1993		0,0	1,5	25,4	14,6	10,2	45,8	2,5	0,06	1,3

В их составе также преобладали крупные илы и очень мелкие пески, однако содержание крупных илов за 29 лет снизилось в среднем на 7 % (с 38 % в 1993 г. до 31 % в 2021 г.), а содержание очень мелких песков, наоборот, увеличилось в среднем на 3 % (с 27 % в 1993 г. до 30 % в 2023 г.). Что касается основных примесей в составе, то ими по-прежнему являлись мелкие пески и илистые частицы, при этом количество песков увеличилось на 3 %, а илистых частиц – на 5 % снизилось.

Юго-западный седиментационный район по своим гидродинамическим условиям преимущественно аккумулятивный, характеризующийся широким развитием илистых отложений и распространением глинистых илов, отсутствующих в других частях залива. Для выявления изменений в составе ДО в этом районе были изучены 19 проб, полученных в 2021 г. в тех же точках, что и в 1993 г. (рис. 1).

Результаты исследований 1993 г. показали, что ДО юго-западной части залива представлены песками, песками илистыми, илами песчанистыми, илами и глинистыми илами. К настоящему времени произошли определенные изменения в составе фракций, однако они не привели к изменению типов осадков на контрольных точках. Некоторые из результатов гранулометрического анализа проб ДО, отобранных в этой части залива в 1993 и 2021 гг., представлены на диаграмме (рис. 2). На ней видно, что в составе ДО, изученных в 2021 г., произошло увеличение песчаных и снижение илистых и глинистых частиц.

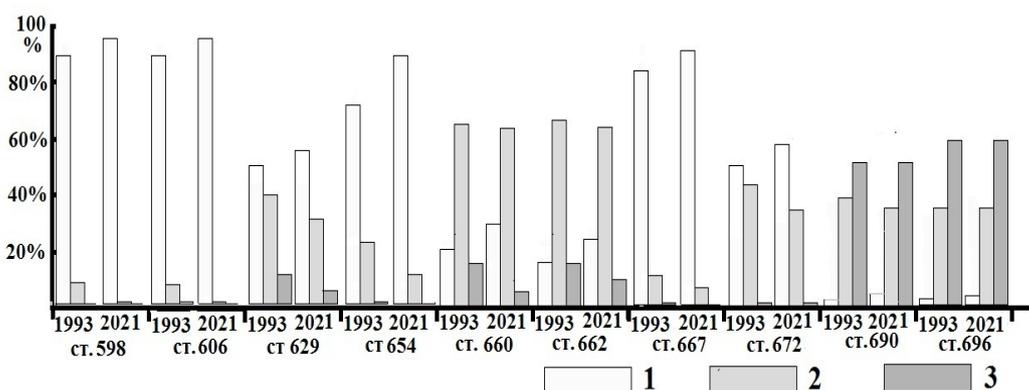


Рис. 2. Содержание песчаных, илистых и глинистых частиц в образцах ДО, отобранных в 1993 и 2021 гг. в юго-западной части Калининградского залива:

1 – песок; 2 – ил; 3 – глинистый ил

Fig. 2. The content of sandy, silty and clay particles in samples of bottom sediments collected in 1993 and 2021 years in the southwestern part of the Kaliningrad Bay:

1 – sand; 2 – silt; 3 – clayey silt

Интересными являются полученные данные о количественных изменениях песчаных и илистых частиц в составе различных типов ДО для всей территории залива, произошедших за 29 лет. В 1993 г. доля песчаных частиц в песчаных отложениях составляла в среднем 72 %, а в 2021 г. она возросла до 78 %. В илах содержание песка увеличилось с 17 до 23 %, а в глинистых илах – с 3 до 7 % (табл. 2). Что касается илистых частиц, то их доля в песчаной фракции за 29 лет снизилась в среднем на 6 %, в илах на 2 %, а в глинистых илах содержание илистых частиц снизилось на 4 %.

Таблица 2. Содержание песчаных и илистых частиц в различных типах ДО Калининградского залива (в среднем для 39 проб)
Table 2. The content of sandy and silty particles in various types of bottom sediments of the Kaliningrad Bay (on average for 39 samples)

Типы осадков	Содержание песчаных частиц, %	
	1993 г.	2021 г.
Песок	72	78
Ил	17	23
Глинистый ил	3	7
	Содержание илистых частиц, %	
Песок	19	13
Ил	62	60
Глинистый ил	39	35

Известным гранулометрическим параметром, характеризующим силу, скорость потока и гидродинамический уровень среды осадконакопления, является медианный диаметр (Md). Он представляет собой меру величины зерен, указывающую на минимальную энергию транспортирующей среды, необходимую для переноса осадка. Выполненные расчеты показали, что за 29-летний период значение Md для песка увеличилось в среднем с 0,072 мм в 1993 г. до 0,124 мм в 2021 г., для глинистых илов оно почти не изменилось, а для всех типов осадков (в среднем для всех точек исследования) значение Md увеличилось с 0,045 мм в 1993 г. до 0,059 мм в 2021 г. Характерным является тот факт, что сортированность осадков за этот период почти не изменилась.

Тенденция увеличения в составе отложений песчаных частиц хорошо просматривается на трехкомпонентных диаграммах (рис. 3), где все точки исследований 2021 г. сместились (относительно точек 1993 г.) в «песчаные» углы треугольников.

В то же время было выявлено, что изменения, произошедшие в составе осадков за 29 лет, неодинаковы, а величина таких изменений зависит от типов осадков. Наибольшее увеличение количества осадочных частиц песчаных размерностей за этот период отмечено в осадках с преобладанием в их составе песчаного материала, т. е. в песках. Так, например, на станциях 541 и 544, расположенных на небольших глубинах (1,5–2,5 м), содержание суммарной песчаной фракции увеличилось на 6,8 и 18 % соответственно. При этом количество самого тонкого, илистого, материала уменьшилось на 3 % (ст. 541) и на 10 % (ст. 544). Однако на станциях 549, 690, 677, где преобладают илистые и алевроитовые отложения, со-

держание суммарной песчаной фракции увеличилось не более чем на 3 %, а содержание илстых фракций практически не изменилось.

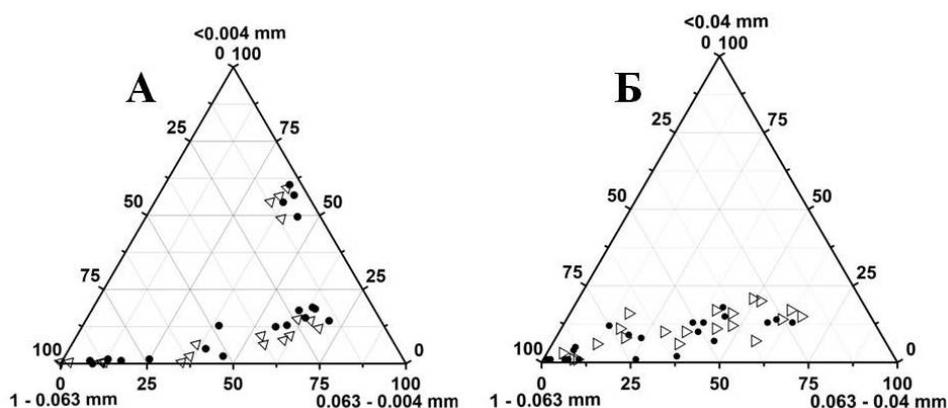


Рис. 3. Треугольные диаграммы соотношения песчаных, алевритовых и илстых частиц в пробах ДО, отобранных в 1993 г. (треугольники) и 2021 г. (точки):

А – юго-западный седиментационный район; Б – эстуарий р. Преголи (восточная часть залива)

Fig. 3. Ternary diagrams of the ratio of sandy, aleuritic and silty particles in bottom sediments sampled in 1993 year (triangles) and in 2021 year (points):

А – south-western sedimentation area; Б – estuary of the Pregolya River (eastern part of the Bay)

Результаты исследования подтвердили выдвинутую В. А. Чечко гипотезу, согласно которой в Вислинском заливе в настоящее время доминируют процессы активного переотложения ДО, конечным результатом которых является частичный вынос тонкого осадочного материала в море, и, как следствие, увеличение ареала песков и сокращение территорий дна, занятых илстыми отложениями. Действие таких процессов обусловлено сочетанием нескольких факторов – небольшими глубинами водоема, открытостью его акватории для преобладающих в регионе ветров западных румбов, свободным водообменом с морем и влиянием сгонно-нагонных движений водных масс.

Ход седиментационных процессов и характер образующихся осадков во многом зависят от факторов среды, среди которых глубина входит в перечень наиболее важных. При небольших глубинах водоема волнение и ветровые течения охватывают всю водную толщу и воздействуют на дно, вызывая взмучивание ДО. Проведенные исследования [13] показали, что волновому воздействию в разные сезоны подвергается от 40 до 100 % дна залива, а регулярным ветроволновым взмучиванием ДО охвачена практически вся площадь дна, за исключением периода ледостава. При взмучивании часть ДО переходит во взвешенное состояние, при этом более грубые осадочные компоненты после стихания волнения достаточно быстро вновь осаждаются на дно. Мелкие глинистые и илстые частицы могут находиться во взвешенном состоянии довольно продолжительное время, а при сгонных явлениях, выполняющих роль отливов в бесприливном море, с потоками воды – выноситься за пределы водоема, в море. В результате в составе ДО происходит снижение количества мелких частиц и некоторое увеличение их медианного диаметра.

О регулярном взмучивании верхнего слоя осадков свидетельствует, в частности, отсутствие слоистости в верхних частях литологических колонок, отображенных в заливе [14]. Процессы взмучивания верхнего слоя ДО, сопровождающиеся транспортировкой осадочного материала, наблюдаются и в польской, самой удаленной от морского пролива части залива, где ранее преобладали процессы аккумуляции ДО [15]. Таким образом, важнейшей чертой осадконакопления для всего залива в настоящее время является несоответствие между энергетической возможностью (гидродинамической активностью) и объемом поступающих седиментационных веществ, которое проявляется в масштабном переотложении ДО и удалением из их верхнего слоя мелких осадочных частиц.

Следует отметить, что взмучивание ДО – характерное явление для неглубоких водоемов. В закрытых водоемах взмучивание приводит лишь к перераспределению осадочных компонентов в пределах его акватории. В водоемах, имеющих связь с морем, при взмучивании осуществляется не только перераспределение, но и транспортировка наиболее мелких компонентов за пределы водоема, в море. Сложившаяся в настоящий момент обстановка осадконакопления весьма благоприятна для экосистемы залива, в ней действуют механизмы самоочищения. При выносе за пределы водоема мелких осадочных частиц вместе с ними выносятся также всевозможные загрязняющие вещества, которые, как было сказано выше, накапливаются именно в мелких фракциях. Немаловажным является и то, что при сохранении данной обстановки осадконакопления заливу в будущем не грозит обмеление, заиление и превращение его в водоем зарастающего типа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За 29 лет в составе верхнего слоя ДО Калининградского залива произошли существенные изменения. Больше всего они коснулись песчаных фракций, в них за этот период увеличилось количество частиц песчаной размерности и уменьшилось количество илистых частиц. В илистых фракциях также выявлено увеличение содержания песчаных частиц при незначительном снижении илистых, что отразилось на некотором увеличении медианного диаметра ДО залива.

Такие изменения в составе ДО обусловлены активными процессами ветроволнового взмучивания, для которого в заливе имеются идеальные природные условия – небольшие глубины, открытость акватории для преобладающих в регионе ветров западных румбов, обширные площади дна со слабо уплотненными отложениями. При взмучивании в закрытых неглубоких водоемах осуществляется перераспределение осадочных компонентов, а в водоемах, имеющих связь с морем, наряду с перераспределением – частичная транспортировка наиболее мелких из них за пределы водоема.

Ранее подобные процессы отмечались в эстуарии р. Преголи (восточная часть Калининградского залива), сейчас установлено, что они характерны для всей акватории Вислинского залива, включая его юго-западную часть. Таким образом, важнейшей особенностью современного осадконакопления в заливе является регулярное взмучивание верхнего слоя ДО, сопровождающееся переотложением осадочных компонентов и частичной транспортировкой мелких частиц во взвешенном состоянии в море. Действующие процессы способствуют самоочищению ДО, поскольку вместе с мелкими частицами с акватории залива выносятся

сорбированные ими загрязняющие вещества. Полученные результаты исследования позволяют предположить, что при сохранении существующей обстановки осадконакопления эволюционное развитие залива не приведет его к обмелению, заилению дна или заболачиванию.

Список источников

1. Kennish M.J. Coastal lagoon. Encyclopedia of Estuaries. Springer. 2015. P. 140–143.
2. Gic-Grusza G., Dudkowska A. Wind waving. Vistula Lagoon. PWN Warszawa. 2018. P. 86–89.
3. Burska D., Szymczak E. Suspensions in the waters of the Vistula Lagoon. PWN Warszawa. 2018. P. 115–128.
4. Chubarenko B., Zakirov R. Water Exchange of Nontidal Estuarine Coastal Vistula Lagoon with the Baltic Sea. Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering, 2021. V. 147. N 4. P. 05021005. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000633](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000633) (дата обращения: 05.07.2023).
5. Лазаренко Н. Н., Маевский А. Гидрометеорологический режим Вислинского залива. Ленинград: Гидрометеоздат. 1971. 279 с.
6. Александрова В. В., Иванов В. Б., Цыганова В. И. Динамика химических веществ в донных отложениях рек на территории воздействия нефтедобывающей промышленности // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2022. Т. 14. № 5. С. 11–26.
7. Бреховских В. Ф., Казмирук Т. Н., Казмирук В. Д. Донные отложения Иваньковского водохранилища. М.: Наука. 2006. 176 с.
8. Background study on non-residual phase of elements in Changjiang and Huanghe estuarine sediments / Liu Xin-wei et al. // Chin. J. Oceanol. And Limnol. 1996. V. 14. N 3. P. 282–290.
9. Буданова Т. Е., Озмидов О. Р., Озмидов И. О. Современные методы изучения гранулометрического состава грунтов // Инженерные изыскания. 2013. № 8. С. 66–73.
10. Wentworth C. K. A scale of grade and class terms for clastic sediments // Journal of Geology. 1922. V. 30. P. 377–392.
11. Мясникова Н. А., Потахин М. С. Гранулометрический состав донных отложений озера Торосъярви (бассейн Белого моря) // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2021. № 1. С. 45–56.
12. Чечко В. А., Топчая В. Ю. Пространственное распределение тяжелых металлов в донных осадках Калининградского залива // Успехи современного естествознания. 2022. № 9. С. 61–66.
13. Чубаренко Б. В. Анализ зон вторичного загрязнения акваторий Калининградского и Куршского заливов // География и природные ресурсы. 1994. № 3. С. 33–40.
14. Chechko V. A. Evolution of sedimentation in the Vistula Lagoon of the Baltic Sea due to anthropogenic impact // Revista de la Universidad del Zulia. 2021. V. 12. N 33. P. 131–148.

15. Szymczak E. Characteristics of Sediments in a Changing Environmental Conditions in Vistula Lagoon (Poland) // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. 012048. P. 1–10.

References

1. Kennish M. J. Coastal lagoon. Encyclopedia of Estuaries. Springer, 2015, pp. 140–143.
2. Gic-Grusza G., Dudkowska A. Wind waving. Vistula Lagoon. PWN Warszawa, 2018, pp. 86–89.
3. Burska D., Szymczak E. Suspensions in the waters of the Vistula Lagoon. PWN Warszawa, 2018, pp. 115–128.
4. Chubarenko B., Zakirov R. Water Exchange of Nontidal Estuarine Coastal Vistula Lagoon with the Baltic Sea. Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering, 2021, vol. 147, no. 4. pp. 05021005, available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000633](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000633) (Accessed 05 July 2023).
5. Lazarenko N. N., Maevskiy A. *Gidrometeorologicheskiy rezhim Vislinskogo zaliva* [Hydrometeorological conditions of the Vistula Lagoon]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ, 1971, 279 p.
6. Aleksandrova V. V., Ivanov V. B., Tsyganova V. I. Dinamika khimicheskikh veshchestv v donnykh otlozheniyakh rek na territorii vozdeystviya nefte dobyvayushchey promyshlennosti [Dynamics of chemicals in river bottom sediments in the area of oil industry impact]. *Sibirskiy zhurnal biologicheskikh nauk i sel'skogo khozyaystva*, 2022, vol. 14, no. 5, pp. 11–26.
7. Brekhovskikh V. F., Kazmiruk T. N., Kazmiruk V. D. *Donnye otlozheniya Ivan'kovskogo vodokhranilishcha* [Bottom sediments of the Ivankovsky reservoir]. Moscow, Nauka Publ., 2006, 176 p.
8. Liu Xin-wei et al. Background study on non-residual phase of elements in Changjiang and Huanghe estuarine sediments. *Chin. J. Oceanol. And Limnol*, 1996, vol. 14, no. 3, pp. 282–290.
9. Budanova T. E., Ozmidov O. R., Ozmidov I. O. Sovremennye metody izucheniya granulometricheskogo sostava gruntov [Recent methods of studying grain size composition of soils]. *Inzhenernye izyskaniya*, 2013, no. 8, pp. 66–73.
10. Wentworth C. K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 1922, no. 30, pp. 377–392.
11. Myasnikova N. A., Potakhin M. S. Granulometricheskii sostav donnykh otlozheniy ozera Toros"yarvi (basseyn Belogo morya) [Grain size composition of bottom sediments of Lake Torosyarvi (White Sea basin)]. *Vestnik VGU*, 2021, no. 1, pp. 39–57.
12. Chechko V. A., Topchaya V. Yu. Prostranstvennoe raspredelenie tyazhelykh metallov v donnykh osadkakh Kaliningradskogo zaliva [Spatial distribution of heavy metals in bottom sediments of the Kaliningrad Bay]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2022, no. 9, pp. 61–66.
13. Chubarenko B. V. Analiz zon vtorichnogo zagryazneniya akvatoriy Kaliningradskogo i Kurshskogo zalivov [Analysis of secondary pollution zones in the water areas of the Kaliningrad and Curonian Bays]. *Geografiya i prirodnye resursy*, 1994, no. 3, pp. 33–40.

14. Chechko V. A. Evolution of sedimentation in the Vistula Lagoon of the Baltic Sea due to anthropogenic impact. Revista de la Universidad del Zulia, 2021, vol. 12, no. 3, pp. 131–148.

15. Szymczak E. Characteristics of Sediments in a Changing Environmental Conditions in Vistula Lagoon (Poland). IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci, 2019, 012048, pp. 1–10.

Информация об авторах

В. А. Чечко – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

В. Ю. Топчая – научный сотрудник

Information about the authors

V. A. Chechko – PhD in Geology and Mineralogy, Senior Researcher

V. Yu. Topchaya – Researcher

Статья поступила в редакцию 10.07.2023; одобрена после рецензирования 20.07.2023; принята к публикации 29.09.2023.

The article was submitted 10.07.2023; approved after reviewing 20.07.2023; accepted for publication 29.09.2023.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА «ИЗВЕСТИЯ КГТУ»

Общие требования

Журнал бесплатно публикует оригинальные неопубликованные ранее статьи, удовлетворяющие критериям высокого научного качества по научным направлениям: естественно-научные и математические, биологические и сельскохозяйственные, технические, экономические науки, промышленное рыболовство. Автор (авторы) несет ответственность за достоверность результатов исследования и гарантирует, что им не нарушены авторские права третьих лиц, что в тексте статьи нет некорректных или незаконных заимствований.

Автор самостоятельно или в соавторстве может представить в номер не более одной статьи. Научные статьи принимаются в редакцию в течение всего года, публикуются в порядке живой очереди по мере заполнения портфеля редакции. Редакция журнала оставляет за собой право производить сокращения и редакционные изменения рукописи. Рукописи статей, принятых к публикации, авторам не возвращаются.

В редакцию журнала авторы представляют:

– **распечатку рукописи**, подписанную всеми авторами, и ее электронную версию. Текст рукописи должен полностью соответствовать тексту электронного варианта, страницы не нумеруют;

– **внешнюю или внутреннюю рецензию доктора наук** (на стандартном бланке), заверенную в установленном порядке. Бланк рецензии можно скачать на сайте университета в разделе «Наука и инновации – Научные журналы – Известия КГТУ». Рецензент должен являться признанным специалистом по тематике рецензируемого материала и иметь в течение последних трех лет публикации по тематике рецензируемой статьи;

– **экспертное заключение** о возможности открытого опубликования статьи (иногородние могут выслать электронной почтой).

В дальнейшем с автором заключается **Лицензионный договор** и оформляется **Акт передачи – приемки рукописи**.

Объем статьи

Составляет от восьми до четырнадцати страниц текста, включая рисунки, таблицы, список литературы и информацию об авторах.

Компьютерный набор статьи

Должен удовлетворять следующим требованиям: формат бумаги – А4, гарнитура шрифта – Times New Roman, кегль 12, ориентация – книжная, поля сверху, слева, справа – 3 см, снизу – 3,5 см; абзац с отступом Tab. 1,27; межстрочный интервал –

одинарный. Материалы должны быть оформлены с применением средств Microsoft Office 2003 (расширение текстового файла *.doc).

При наборе текста не допускается применять стили при формировании текста, вносить изменения в шаблон или создавать свой для формирования текста, ставить пробелы перед знаками препинания, применять любые разрядки слов. Необходимо слова внутри абзаца разделять одним пробелом, набирать текст без принудительных переносов, установить автоматическую расстановку переносов.

Таблицу, в зависимости от ее размера, помещают под текстом, в котором впервые дана ссылка на нее, или на следующей странице. Допускается помещать таблицу вдоль длинной стороны листа, при этом нумеруют арабскими цифрами графы и строки первой части таблицы. Слово «Таблица» указывают один раз слева (без отступа) над первой частью таблицы, после номера ставят точку, следом с прописной идет название таблицы, точку в конце не ставят. Таблица должна быть вставлена автоматически (через «Таблица: Добавить таблицу»). Название таблицы дублируют на английском языке под русским названием, и наоборот, если статья на английском языке (Таблица 1. Table 1.).

Рисунки. Допускаются черно-белые и цветные четкие рисунки, выполненные средствами компьютерной графики или сканированные. Рисунки могут быть введены в текст статьи или выполнены в виде отдельных графических файлов. В последнем случае необходимо указать место расположения рисунка, написав на полях рукописи после абзаца, в котором он впервые упоминается: Рис. 1. и т. д. Все рисунки должны быть пронумерованы (Рис. 1. и т. д.) и иметь подрисуночные подписи. Номер рисунка и подрисуночная подпись располагаются под рисунком. Название рисунка дублируют на английском языке под русским названием, и наоборот, если статья на английском языке (Рис. 1. Fig. 1.). Точка в конце подрисуночной подписи не ставится.

Все обозначения на рисунке должны соответствовать обозначениям в тексте. Фотографии должны быть сделаны с хорошего негатива контрастной печатью. Ссылки на все рисунки в тексте обязательны. Ширина рисунка не должна быть больше ширины полосы набора текста.

Если в статье один рисунок или одна таблица, они не нумеруются.

Не допускается заканчивать статью рисунком или таблицей.

Все рисунки и таблицы должны быть читаемы и расположены по центру полосы набора.

Формулы. Все формулы набираются в формульном редакторе, нумеруются, на них должны быть ссылки в тексте в круглых скобках. Формулы выносятся отдельной строкой после ссылки с отступом два Тав. Номер формулы вводится в круглые скобки и выравнивается вправо. При наборе формул рекомендуется использовать следующие кегли шрифтов: основной – 11; крупный индекс – 7; мелкий индекс – 5; крупный символ – 14; мелкий символ – 10. Гарнитура шрифта Times New Roman. Для набора математических формул используют буквы латинского алфавита (светлый курсив), греческого алфавита (светлый прямой шрифт) и готический шрифт (светлый прямой). Индексы формул, обозначенные буквами латинского алфавита, набирают курсивом (m_i – масса i -го элемента), а обозначенные буквами русского алфавита – прямым шрифтом (l_p – длина разбега; $V_{\text{пос}}$ посадочная скорость). Сокращенные

обозначения физических величин и единиц измерения (кВт, Ф/м, W/m) – светлым прямым без точек. Числа и дроби в формулах должны быть набраны светлым прямым шрифтом. Прямым шрифтом набирают также некоторые математические обозначения (sin, tg; max, min; const; log, det, exp и т. д.). Векторные величины следует обозначать жирным курсивом, а не надсимвольной чертой: \mathbf{e} не \bar{e} . Перенос в формулах допускается делать в первую очередь на знаках (=, », <, > и др.), во вторую очередь – на отточии (...), на знаках сложения и вычитания (+, –), в последнюю – на знаке умножения в виде крестика (×). Перенос на знаке деления не допускается. Математический знак, на котором разрывается формула при переносе, обязательно должен быть повторен в начале второй строки. При переносе формул нельзя отделять выражения, содержащиеся под знаком интеграла, логарифма, суммы, произведения, от самих знаков. Небольшие формулы, не имеющие самостоятельного значения, набираются внутри строк текста. Наиболее важные формулы, все нумерованные формулы, а также длинные и громоздкие формулы, содержащие знаки суммирования, произведения и т. п., набирают отдельными строками. Отбивка до и после строки с формулой в этом случае – 6 пунктов. Вместо выражения вида $\frac{a}{b}$ рекомендуется писать a/b. Отдельные элементы математических формул, вынесенные в текст, набираются по приведенным выше правилам (прямой шрифт в формуле – прямой шрифт в тексте, курсив в формуле – курсив в тексте).

Химические символы (Ag, Cu) набирают прямым шрифтом. Для набора рекомендуется использовать редактор Chem Window.

Единицы физических величин следует приводить в международной системе СИ по ГОСТ 8.417-2002. ГСИ. Единицы величин.

Все аббревиатуры в тексте должны быть расшифрованы. Разрешаются лишь общепринятые сокращения названий мер, физических, химических и математических величин.

Структура статьи

ВВЕДЕНИЕ (состояние проблемы, задачи исследования) по центру, прописными буквами, шрифт прямой, светлый, далее через один интервал текст.

Через один интервал **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ** (постановка задачи, методы и результаты исследования, их обсуждение – по центру, прописными буквами, шрифт прямой, светлый, через один интервал текст). Основную часть рекомендуется разбивать на разделы с названиями, отражающими их содержание.

Через один интервал **ЗАКЛЮЧЕНИЕ** (выводы – по центру, прописными буквами, шрифт прямой, светлый), далее через один интервал текст

Составные части статьи и порядок их следования

1. Научная статья (слева без отступа, с прописной буквы, шрифт прямой, светлый, точка в конце не ставится).

2. С новой строки индекс по универсальной десятичной классификации (УДК) слева без отступа (прописными буквами, шрифт прямой, светлый, без двоеточия после букв, точка в конце не ставится).

3. С новой строки DOI (слева без отступа, прописными буквами, шрифт прямой, светлый точка в конце не ставится).

4. Через один интервал по центру **Название статьи** на русском языке (с прописной, шрифт полужирный, прямой, точка в конце не ставится).

При публикации статьи частями в нескольких выпусках издания части должны быть пронумерованы, у всех частей следует указывать общее заглавие статьи. Если части имеют, помимо общего, частное заглавие, то его приводят после обозначения и номера части. Пример:

Изучение закономерностей кристаллизации гексагидрата хлорида алюминия из солянокислых растворов. Часть 2. Параметры кристаллизации гексагидрата хлорида алюминия

5. Через один интервал основные сведения об авторе (авторах) без обозначения организационно-правовой формы юридического лица: ФГБУН, ФГБОУ ВО, ПАО, АО и т. п. (слева без отступа, см. в образце оформления статьи ниже).

6. Через один интервал с отступом приводят слово **Аннотация** (полужирный курсив, в конце ставят точку). Текст аннотации дается в подбор, рекомендуемый объем 200–250 слов.

Представляет собой краткую характеристику текста с точки зрения его назначения, содержания, вида, формы и других особенностей. Она передает главную, ключевую идею текста до ознакомления с его полным содержанием. Научная аннотация условно делится на три части: 1. Презентация вопроса или проблемы, которым посвящена статья. 2. Описание хода исследования. 3. Выводы: итоги, которых удалось достичь в результате проведенного исследования.

Запрещается использовать дословный текст из статьи во избежание повторов, название работы, а также таблицы, графики и внутритекстовые ссылки.

В начале не повторяется название статьи, аннотация не разбивается на абзацы. Аннотация должна быть полноценной и информативной, не содержать общих слов, отражать содержание статьи и результаты исследований, строго следовать структуре статьи. Следует избегать использования вводных слов и оборотов, лишних вводных фраз, например, «автор статьи рассматривает...», не нужно подчеркивать личный вклад автора. Исторические справки, если они не составляют основное содержание документа, описание ранее опубликованных работ и общеизвестные положения, в аннотации не приводятся. В тексте аннотации следует применять значимые слова из текста статьи, избегать сложных грамматических конструкций. Вводная часть минимальна, место исследования уточняется до области (края). Изложение результатов содержит конкретные сведения (выводы, рекомендации и т. п.). Допускается введение сокращений в

пределах аннотации (понятие из 2–3 слов заменяют на аббревиатуру из соответствующего количества букв, в 1-й раз дается полностью, сокращение – в скобках, далее используется только сокращение). Числительные, если не являются первым словом, передаются цифрами. Нельзя использовать аббревиатуры (например, названий учреждений) без расшифровки и сложные элементы форматирования (например, верхние и нижние индексы). Категорически не допускаются вставки через меню «Символ», знак разрыва строки, знак мягкого переноса, автоматический перенос слов. Значения t° в английском варианте обозначают как «deg C».

7. С новой строки с отступом приводят **Ключевые слова** (полужирный курсив, в конце двоеточие), они должны максимально точно отражать предметную область статьи (даются в подбор, разделяются запятой, буквы строчные, шрифт прямой, светлый, в конце ставят точку).

8. С новой строки с отступом **Благодарности** (если есть) организациям (учреждениям), научным руководителям и другим лицам, оказавшим помощь в подготовке статьи, сведения о грантах, финансировании подготовки и публикации статьи, проектах, научно-исследовательских работах, в рамках или по результатам которых опубликована статья (см. в образце оформления статьи ниже).

9. С новой строки с отступом могут быть приведены сведения о финансировании исследования, подготовки и публикации статьи с предшествующим словом **Финансирование:** (после слова ставят двоеточие).

10. С новой строки с отступом приводят библиографическую запись на статью **Для цитирования:** (см. в образце оформления статьи ниже).

Далее все сведения должны быть представлены на английском языке:

11. Original article (через один интервал, слева без отступа, с прописной буквы, шрифт прямой, светлый, точка в конце не ставится).

12. Через один интервал по центру **Название статьи** на английском языке (с прописной, шрифт полужирный, прямой, точка в конце не ставится).

13. Через один интервал основные сведения об авторе (авторах) – имя и фамилию приводят в транслитерированной форме на латинице полностью, отчество сокращают до одной буквы (в отдельных случаях, обусловленных особенностями транслитерации, до двух букв), см. в образце оформления статьи ниже.

14. Через один интервал с отступом **Abstract**. Недопустимо использование машинного перевода, вместо десятичной запятой используется точка. Все русские аббревиатуры передаются в расшифрованном виде, если у них нет устойчивых аналогов в английском языке (допускается: ВТО – WTO, ФАО – FAO и т. п.). Безличные конструкции переводятся с использованием пассива.

15. С новой строки с отступом **Keywords:** (полужирный курсив, в конце двоеточие), ключевые слова даются в подбор, разделяются запятой, буквы строчные, шрифт прямой, в конце ставят точку).

16. С новой строки с отступом **Acknowledgments** (если есть), после слова ставят двоеточие.

17. С новой строки с отступом **Funding** (если есть), после слова ставят двоеточие.

18. С новой строки с отступом **For citation**: см. в образце оформления статьи ниже.

19. Через один интервал с отступом текст статьи, включающий в себя обязательные структурные элементы (см. структуру статьи).

Нельзя использовать в текстах формулы-картинки и прочие искусственно вставленные символы. Ссылки на все приведенные в списке литературы источники в тексте заключаются в квадратные скобки, например: [2], [4–7] (здесь тире), [1, 18, 25]. Если в тексте есть прямая цитата, заключенная в кавычки, то обязательно должна быть указана страница, на которой эта цитата находится в цитируемом источнике. Например: [7, с. 28]. Ссылки на неопубликованные работы и работы, находящиеся в печати, не допускаются.

20. Через один интервал после текста статьи **Список источников** (по центру с прописной, шрифт полужирный, прямой, точка в конце не ставится). Оформляется по ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». В список включаются только те работы, на которые автор ссылается в статье. Источники в списке литературы нумеруют и располагают в порядке их упоминания в тексте (в порядке цитирования).

Требования к источникам:

- Не менее 15 источников, из них половина давностью менее 5 лет
- Процент самоцитирования не выше 10–20 %
- Зарубежные публикации, изданные в течение последних 5 лет

Рекомендуется включать ссылки на научные статьи, монографии, сборники статей, сборники конференций, электронные ресурсы с указанием даты обращения, патенты.

Не рекомендуется включать ссылки на учебники, учебно-методические пособия, конспекты лекций, ГОСТы и др. нормативные документы, на законы и постановления, а также на архивные документы (если все же необходимо указать такие источники, то они оформляются в виде сносок).

Нежелательны ссылки на диссертации и авторефераты диссертаций (такие ссылки допускаются, если результаты исследований еще не опубликованы, или не представлены достаточно подробно).

21. Через один интервал после списка источников **References** (по центру с прописной, шрифт полужирный, прямой, точка в конце не ставится). Нумерация записей должна совпадать с нумерацией в основном перечне затекстовых библиографических ссылок.

References представляет собой транслитерированный список литературы. Транслитерируются только источники, написанные кириллицей; французские, немецкие, итальянские, польские и прочие источники не переводятся, а остаются в references неизменными.

Для выполнения транслитерации необходимо зайти на сайт <http://translit-online.ru/> и настроить перевод: *ë* → *yo*; *й* → *y*; *х* → *всегда kh*; *ц* → *ts*; *щ* → *shch*; *э* → *e*. Транслитерированный текст в списке References необходимо отредактировать и добавить переводы на английский язык; заменить знаки «:», «/» и «//» на точку или запятую; после транслитерации названия издательства добавить Publ.; вместо *Москва* указать *Moscow*, вместо *Санкт-Петербург* – *Saint-Petersburg*; исправить обозначение страниц: вместо 235 с. – 235 p., вместо S. 45–47 – pp. 45–47; курсивом выделить название источника и название журнала (образец оформления см. ниже).

22. Через один интервал дополнительные сведения об авторе (авторах), инициалы разделяют пробелом (слева без отступа, дублируют на английском языке: ученая степень, звание, должность и др. (см. в образце оформления статьи ниже).

23. Сведения о дате поступления рукописи в редакцию, дате одобрения после рецензирования и дате принятия статьи к опубликованию.

24. Знак охраны авторского права приводят по ГОСТ Р 7.0.1 внизу первой полосы статьи с указанием фамилии и инициалов автора (авторов) или других правообладателей и года публикации статьи.

Образцы оформления списка источников

Монография

1. Агеев В. В. Грузопассажирские суда в военных конфликтах: монография. Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2013. 106 с.
2. Ториков В. Е., Мельникова О. В., Ториков В. В. Выращивание ярового ячменя на крупяные, пивоваренные и кормовые цели на юго-западе Центрального региона России: монография. Брянск: Изд-во БГСХА, 2014. 90 с.

Книга

Книга одного – трех авторов

1. Новикова А. М. Универсальный экономический словарь. Москва: Экономика, 1995. 135 с.
2. Сидоркина А. Н., Сидоркин В. Г. Биохимические аспекты травматической болезни и ее осложнений. Москва: ЭкоТрендз, 2010. 315 с.
3. Тарасевич Л. С., Гребенников П. И., Леусский А. И. Макроэкономика: учебник. Москва: Высш. образование, 2011. 658 с.

4. Максименко В. Н., Афанасьев В. В., Волков Н. В. Защита информации в сетях сотовой подвижной связи / под ред. О. Б. Макаревича. Москва: Горячая линия-Телеком, 2009. 360 с.

Книга четырех и более авторов

Описание начинается с основного заглавия. В сведениях об ответственности указываются либо все авторы, либо первый автор с добавлением в квадратных скобках сокращения [и др.].

1. Религии мира: пособие для преподавателей / Я. Н. Шапов [и др.]. Санкт-Петербург: Эксмо, 1996. 496 с.
2. История России в новейшее время: учебник / А. Б. Безбородов, Н. В. Елисеева, Т. Ю. Красовицкая, О. В. Павленко. Москва: Проспект, 2014. 440 с.

Книги, не имеющие индивидуальных авторов

1. Сборник задач по физике: учеб. пособие для вузов / под ред. С. М. Павлова. 2-е изд., доп. Москва: Высшая школа, 1995. 347 с.
2. Правильное питание: справочник. Москва: Эксмо, 2008. 704 с.
3. Кормопроизводство в России: всероссийский сб. науч. ст. Вып. 3. Казань; Санкт-Петербург, 2007. 268 с.

Отдельный том многотомного издания под общим заголовком

1. Пальцев М. А., Аничков М. Н. Патологическая анатомия: в 2 т. Москва: Медицина, 2001. Т. 2, ч. 1. 736 с.

Глава из книги (сборника)

1. Макушин В. Д., Волокитина Е. А. Причины неудач и осложнений при выполнении опорных остеотомий с применением аппарата Илизарова // Лечение врожденного вывиха бедра у взрослых / под ред. В. И. Шевцова, В. Д. Макушина. Курган, 2004. Гл. 8. С. 372–402.
2. Белоус Н. М. Храня теплую память о прошлом // Великая Отечественная война 1941–1945 гг. в истории моей семьи: сборник статей / под общей редакцией Р. В. Новожеева. Брянск: Изд-во БГАУ, 2015. С. 4–5.

Книги в интернете

Книги одного – трех авторов

1. Карпенков С. Х. Экология: учебник. Электрон. текстовые данные. Москва: Логос, 2014. 400 с. URL: <http://www.iprbookshop.ru/21892>. ЭБС «IPRbooks» (дата обращения: 15.12.2007).

Книги четырех и более авторов

1. Сборник задач по аналитической геометрии и линейной алгебре: учеб. пособие / Л. А. Беклемишева [и др.]; под ред. Д. В. Беклемишева. Электрон. текстовые данные. Изд. 3-е, испр. Санкт-Петербург: Лань, 2008. URL: <http://e.lanbook.com/view/book/76/> (дата обращения: 15.12.2007).

Статья в журнале

Статья одного – трех авторов

1. Толкачева О. В. Влияние барьерных факторов на стойкость пресервов // Рыбная промышленность. 2006. № 2. С. 14–16.

2. Байдалинова Л. С., Андропова С. В. Перспективы использования растительных антиокислителей для стабилизации гидролитических и окислительных процессов в препаратах полиненасыщенных жирных кислот // Известия Калининградского государственного технического университета. 2013. № 29. С. 74–80.

Статья четырех и более авторов

Описание начинается с основного заглавия. В сведениях об ответственности указываются либо все авторы, либо первый автор с добавлением в квадратных скобках сокращения [и др.]

1. Сверхширокополосные сигналы для беспроводной связи / Ю. В. Андреев, А. С. Дмитриев, Л. В. Кузьмин, Т. И. Мохсени // Радиотехника. 2011. № 8. С. 83–90.

2. Клинико-физиологические составляющие врожденной косолапости / Ю. И. Клычкова [и др.] // Травматология и ортопедия России. 2008. № 3. С. 35–38.

Статья в электронном журнале

1. Белоус Н. А. Прагматическая реализация коммуникативных стратегий в конфликтном дискурсе // Мир лингвистики и коммуникации: электронный

научный журнал. 2006. № 4. URL:
http://www.tverlingua.by.ru/archive/005/5_3_1.htm (дата обращения: 15.12.2007).

Статья, опубликованная в сборниках научных трудов вузов, материалах конференций и семинаров

1. Авдеева Е. В., Евдокимова Е. Б., Заостровцева С. К. Биоразнообразие паразитов рыб и ее особенности в бассейне Вислинского залива (Балтийское море) // I Всерос. науч. интернет-конф. (12 февр. 2013): материалы. Казань, 2013. С. 52–56.
2. Александров Ю. П. Измерение динамической твердости титановых сплавов // Инновации в науке, образовании и бизнесе-2013: XI Междунар. научн. конф. (25–27 сент.): тр.: к 100-летию высш. рыбохоз. образования в России: в 2 ч. Федер. Агентство по рыболовству; ФГБОУ ВПО «КГТУ». Калининград: ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2013. Ч. 2. С. 29–32.

Статья на английском или немецком языке

Для иностранных журналов том обозначается *V.* (англ.) или *Bd.* (нем.), страницы – *P.* или *S.*

1. Neurology control of locomotion in *C.Elegans* in modified by a dominant mutation in the GLR-1 ionotropic glutamate receptor / Yi Zheng et al. // *Neuron*. 1999. V. 24. N 2. P. 347–361.
2. Mank R., Kala H., Strube M. Darstellung und Testung von Polymerpharmaka // *Die Pharmazie*. Bd. 43. N 10. S. 692–693.

Диссертация или автореферат диссертации

1. Данилов Г. В. Как же быть?: дис. ... канд. экон. наук: 05.13.10: утв. 15.07.02. Москва, 1999. 138 с.
2. Назаров И. Г. Развитие коммуникативной компетентности социальных педагогов села в процессе дополнительного профессионального образования: автореф. дис. ... канд. пед. наук: 13.00.08 . Москва, 2002. 24 с.

Переводная книга

1. Себехей В. Теория орбит: ограниченная задача трех тел / пер. с англ. под ред. Г. Н. Дубошина. М.: Наука, 1982. 656 с. [Victor G. Szebehely. *Theory of Orbits: the Restricted Problem of Three Bodies*. New York: Academic Press, 1967].

2. Дейт К. Дж. Введение в системы баз данных / пер. с англ. М.: Вильямс, 2006. 1328 с. [Date C. J. An Introduction to Database Systems. 8th ed. Addison-Wesley, 2003. 1024 p.].

Электронный ресурс локального доступа

1. Смирнов А. И. Информационная глобализация и Россия [Электронный ресурс]: вызовы и возможности. Москва, 2005. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

2. Техника спинальной анестезии [Электронный ресурс] / под ред. Е. М. Шифмана. Москва: ИнтелТек, 2005. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Патентные документы

1. Трехфазный асинхронный электрический двигатель: пат. 2128021 Рос. Федерация. № 2011138279/07 / Беляев Е. Ф., Ташкинов А. А., Цылев П. Н.; заявл. 16.09.11; опубл. 27.03.13. Бюл. № 9. 10 с.

Нормативные документы

1. ГОСТ 7.80-2000. Библиографическая запись. Заголовок. Общие требования и правила составления. Введ. 2001-07-01. Москва, 2000. 7 с.

2. Типовая инструкция по охране труда для пользователей персональными электронно-вычислительными машинами (ПЭВМ) в электроэнергетике: РД 153-34.0-03.298-2001. Введ. с 01.05.2001. Москва, 2002. 91 с.

Официальные документы

1. О лицензировании отдельных видов деятельности: Федер. закон [принят Гос. Думой 13. 07.2001] // Собрание законодательств РФ. 2001. № 33 (ч. 1). Ст. 3430. С. 127–143.

2. О программе государственных гарантий оказания гражданам Российской Федерации бесплатной медицинской помощи на 2009 год: постановление Правительства Рос. Федерации от 31.12.2008 № 10407-ТГ // Заместитель гл. врача. 2009. № 2. С. 98–105.

3. Инструкция о санитарно-противоэпидемическом режиме больниц: утв. Минздравом СССР от 23.03.76 № 288 // Справочник старшей (главной) медицинской сестры. Изд. 6-е, Ростов-на-Дону: Феникс, 2007. С. 378–387.

4. Вопросы системы и структуры федеральных органов исполнительной власти (извлечения): указ Президента РФ от 12.05.2008 № 724 // Здравоохранение. 2008. № 7. С. 135–137.

Образцы оформления References

Монография, книга

1. Shorygin A. A. *Pitanie i pishchevye vzaimootnosheniya ryb Kaspiyskogo morya* [Diet and food relations of fish in the Caspian Sea]. Moscow, Pishchepromizdat Publ., 1952, 268 p.
2. Latyshev V. N. *Tribologiya rezaniya. Kn. 1: Friksionnye protsessy pri rezanii metallov* [Tribology of Cutting, Vol. 1: Frictional Processes in Metal Cutting]. Ivanovo, Ivanovskiy Gos. Univ., 2009.

Статья в журнале

1. Zagurenko A. G., Korotovskikh V. A., Kolesnikov A. A., Timonov A. V., Kardymon D.V. Tekhniko-ekonomicheskaya optimizatsiya dizayna gidrorazryva plasta [Techno-economic optimization of the design of hydraulic fracturing]. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2008, no. 11, pp. 54–57.
2. Sokolov L. I. Pitanie sibirskogo osetra *Acipenser baerii* Brandt r. Leny [Diet of the Siberian sturgeon of the river Lena]. *Voprosy ikhtiologii*, 1966, vol. 6, iss. 3 (40), pp. 550–560.

Статья в электронном журнале

1. Ivanova A. E. Problemy smertnosti v regionakh Tsentral'nogo federal'nogo okruga [Problems of mortality in regions of the Central Federal Okrug]. *Sotsial'nye aspekty zdorov'ya naseleniya*, 2008, no. 2, available at: <http://sotsial'nye.aspekty.ru/content/view/27/50/> (Accessed 19 September 2008).
2. Antipova L. V., Storublevtsev S. A., Getmanova A. A. Kollagensoderzhashchie napitki dlya funktsional'nogo pitaniya [Collagen drinks for functional nutrition]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy*, 2018, vol. 80, no. 3 (77), available at: <http://vestnik.voronezh.ru/content/view/54/30/> (Accessed 19 September 2008).

Статья, опубликованная в материалах конференций

1. Usmanov T. S., Gusmanov A. A., Mullagalin I. Z., Muhametshina R. Ju., Chervyakova A. N., Sveshnikov A. V. Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeneniem gidrorazryva plasta [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Novye resursoberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povysheniya neftegazootdachi"* [Proc. 6th Int. Technol. Symp. "New Energy Saving Subsoil Technologies and the Increasing of the Oil and Gas Impact"]. Moscow, 2007, pp. 267–272.

Диссертация и автореферат

1. Turkovskaia O. V. *Biologicheskie i tekhnologicheskie aspekty mikrobnoy ochistki stochnykh vod i prirodnykh ob"ektov ot poverkhnostno-aktivnykh veshchestv i nefteproduktov. Diss. dokt. biol. nauk* [Biological and technical aspects of microbial purification of sewage and nature objects from surface-active substances and oil products. Dis. dr. biol. sci.]. Saint-Petersburg, 2000, 360 p.

2. Dolganova N. V. *Razrabotka ekologicheskii chistykh tekhnologiy belkovykh kormovykh produktov na osnove vtorichnykh resursov. Avtoreferat diss. dokt. tekhn. nauk* [Development of ecological pure technologies of protein feeding products on the basis of water resources. Abstract of dis. dr. sci.]. Saratov, 1997, 54 p.

Переводная книга

1. Timoshenko S. P., Yound D. H., Weaver W. *Vibration problems in engineering. 4th ed.* New York, Wiley, 1974. 521 p. (Russ. Ed.: Timoshenko S. P., Iang D. Kh., Uiver U. *Kolebaniya v inzhenerenom dele.* Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985, 472 p.).

Патентные документы

1. Belyaev E. F., Tashkinov A. A., Tsylev P. N. *Trekhfaznyy asinkhronnyy elektricheskiiy dvigatel'* [Three-phase asynchronous electric motor]. Patent RF, no. 2011138279/07, 2013.

Нормативные документы

1. State Standard 8.586.5–2005. *Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices.* Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p. (In Russian).

ОФОРМЛЕНИЕ СТАТЬИ С ОДНИМ АВТОРОМ

Научная статья

УДК

DOI (далее вписывает редакция)

Экология и региональная политика энергосбережения

Сергей Юрьевич Глазьев

Аграрный научный центр «Донской», Ростовская область, Зерноград, Россия, serg1784@mail.ru, ORCID (при наличии)

В случае, когда автор работает (учится) в нескольких организациях (учреждениях), сведения о каждом месте работы (учебы) указывают после имени автора на разных строках и связывают с именем с помощью цифр:

Александр Васильевич Попов^{1,2}

¹Национальный исследовательский центр эпидемиологии и микробиологии имени почетного академика Н. Ф. Гамалеи, Москва, Россия, popov@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0003-1288-7561>

²Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова, Москва, Россия

Аннотация. В статье представлена динамика урожайности зерна кукурузы в России и Ростовской области. Определено, что наибольшее количество гибридов кукурузы возделывалось...

Ключевые слова: кукуруза, урожайность, сортовая структура, сортосемена

Благодарности (если есть): автор выражает благодарность Алексею Вадимовичу Зимину за предоставление данных о донной топографии в Белом море (или: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 17-77-3019).

Финансирование (если есть):

Для цитирования: Глазьев С. Ю. Экология и региональная политика энергосбережения // Известия КГТУ (далее вписывает редакция)

Original article

Ecology and regional energy conservation policy

Sergey Yu. Glaz'ev (транслитерация, см. п. 18 выше)

Agricultural Research Center "Donskoy", Rostov region, Zernograd, Russia (на английском языке), serg1784@mail.ru, ORCID (при наличии)

Abstract.

Keywords:

Acknowledgments: the author is grateful to Aleksey V. Zimin for providing the bottom topography data of the White Sea (or: the work was carried out within the framework of project № 17-77-30019 supported by Russian Science Foundation).

Funding (если есть):

For citation: Glaz'ev S. Yu. Ecology and regional energy conservation policy. *Izvestiya KGTU = KSTU News* (далее вписывает редакция).

ТЕКСТ СТАТЬИ

Список источников

References

Информация об авторе

С. Ю. Глазьев – доктор экономических наук, профессор, академик Российской академии наук

Information about the author

S. Yu. Glaz'ev – Doctor of Science (Economy), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences

Статья поступила в редакцию; одобрена после рецензирования; принята к публикации (дату вписывает редакция)

The article was submitted; approved after reviewing; accepted for publication

В конце указывают номер телефона автора, с которым можно снять вопросы по тексту. Телефон не будет опубликован.

ОФОРМЛЕНИЕ СТАТЬИ С НЕСКОЛЬКИМИ АВТОРАМИ

Научная статья

УДК

DOI (далее вписывает редакция)

Дистанционное высшее образование в условиях самоизоляции и проблема институциональных ловушек

Владимир Викторович Вольчик¹, Игорь Михайлович Ширяев²

^{1, 2}Южный Федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹volchik@sfedu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0027-3442> (если есть)

²shiryaev@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1820-8710> (если есть)

Возможно приведение электронного адреса только одного автора, с которым планируется переписка. В этом случае электронные адреса других авторов приводят в дополнительных сведениях об авторах в конце статьи.

Аннотация. В целях определения основных закономерностей возникновения и усиления институциональных ловушек, возникающих в условиях режима самоизоляции в системе высшего образования, авторами были проанализированы нарративы и глубинные интервью основных акторов. Дистанционное образование не является полноценной заменой образования в традиционной форме, затрудняет передачу неявного знания, контроль и обратную связь при обучении, неоднозначно влияет на издержки образовательной деятельности, не позволяет полагаться на надежность информационно-коммуникационных технологий...

Ключевые слова: экономика, управление народным хозяйством, институциональная экономика, дистанционное образование, цифровизация образования, высшее образование, самоизоляция, институциональные ловушки

Благодарности (если есть): авторы выражают благодарность Алексею Вадимовичу Зимину за предоставление данных о донной топографии в Белом море (или: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 17-77-3019).

Финансирование (если есть):

Для цитирования: Вольчик В. В., Ширяев И. М. Дистанционное высшее образование в условиях самоизоляции и проблема институциональных ловушек // Известия КГТУ (далее вписывает редакция)

Original article

Distant higher education under self-isolation and the problem of institutional traps

Vladimir V. Volchik¹, Igor' M. Shiryaev² (транслитерация, см. п. 18 выше)

^{1, 2}Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹volchik@sfn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0027-3442> (если есть)

²shiryaev@sfn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1820-8710> (если есть)

Abstract. To determine the main patterns of emergence and strengthening of institutional traps that arise under self-isolation in the higher education system, the authors analyzed the narratives and in-depth interviews of the main actors. Distance education is not a full-fledged substitute for the traditional education, as it impedes the transfer of implicit knowledge, control and feedback during training, ambiguously influences the costs of educational activities, and does not allow relying on the reliability of information and communication technologies. Transition to distant education can be interpreted as a new stage of evolution of the institutional trap of electronization and digitalization.

Keywords: economics, national economy management, institutional economics, distance education, digitalization of education, higher education, self-isolation, institutional traps

For citation: Volchik V. V., Shiryaev I. M. Distant higher education under self-isolation and the problem of institutional traps. *Current Problems of Economics and Law*. 2020;14(2):236-248. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.21202/1993-047X.14.2020.2.235-248>.

Acknowledgments: the author is grateful to Aleksey V. Zimin for providing the bottom topography data of the White Sea (or: the work was carried out within the framework of project Nr 17-77-30019 supported by Russian Science Foundation).

Funding (если есть):

For citation: Volchik V. V., Shiryaev I. M. Distant higher education under self-isolation and the problem of institutional traps. *Izvestiya KGTU = KSTU News* (далее вписывает редакция).

ТЕКСТ СТАТЬИ

Список источников

References

Информация об авторах

В. В. Вольчик – доктор социологических наук, профессор, заведующий кафедрой «Политология»

И. М. Ширяев – доктор социологических наук, профессор

Information about the authors

V. V. Volchik – Doctor of Science (Sociology), Professor, Head of the Department of Politology

I. M. Shiryaev – Doctor of Science (Sociology), Professor

Статья поступила в редакцию; одобрена после рецензирования; принята к публикации (дату вписывает редакция)

The article was submitted; approved after reviewing; accepted for publication

В конце указывают номер телефона автора, с которым можно снять вопросы по тексту. Телефон не будет опубликован.

Адрес редакции:

236022, г. Калининград, Советский проспект, 1,
Калининградский государственный технический университет

Тел. (4012) 99-59-74

E-mail: svetlana.suprunova@klgtu.ru

<http://klgtu.ru/science/magazine/index.php>

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 30.10.2023. Выход в свет 01.11.2023. Формат 60 x 88 (1/8)
Печ. л. 22,0. Уч.-изд. л. 14,1. Тираж 1000 экз. Заказ № 72.