

ISSN 2079-0333

**ВЕСТНИК
Камчатского
государственного
технического
университета**



Научный
журнал

Основан в 2002 г.

16+

ВЫПУСК

71

2025

Издательство



КамчатГТУ

Петропавловск-Камчатский

ISSN 2079-0333

**ВЕСТНИК
Камчатского
государственного
технического
университета**



**Научный
журнал**

Основан в 2002 г.

Bulletin of Kamchatka State Technical University

**Журнал включен в действующий Перечень рецензируемых научных изданий (ВАК РФ).
Информация о включении журнала представлена на официальном сайте ВАК
(<https://vak.minobrnauki.gov.ru>)**

**Journal is included in List of peer-reviewed publications (State Commission
for Academic Degrees and Titles of the Russian Federation).
Information is available on the official website of State Commission
for Academic Degrees and Titles (<https://vak.minobrnauki.gov.ru>)**

**Журнал размещается
в Научной электронной библиотеке (договор № 22-02/2011 R от 01.02.2011),
в международной информационной системе по водным наукам и рыболовству ASFIS
(Aquatic Sciences and Fisheries Information System) (соглашение от 17.05.2011)**

**Journal is indexed in Scientific electronic library (contract № 22-02/2011 R of 01.02.2011),
in Aquatic Sciences and Fisheries International Information System ASFIS
(agreement on 17.05.2011)**

ВЫПУСК

71

2025

Петропавловск-Камчатский

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- Клочкова Т.А.** (главный редактор) доктор биологических наук, доктор философии биологии (Ph.D.), профессор кафедры экологии и природопользования Камчатского государственного технического университета
- Царенко С.Н.** (научный редактор, технический раздел) доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры технологических машин и оборудования Камчатского государственного технического университета
- Васильев М.В.** (научный редактор, технический раздел) кандидат технических наук, капитан 1 ранга, начальник военного учебного центра при Камчатском государственном техническом университете
- Ольхина О.В.** (ответственный секретарь) заведующий издательством Камчатского государственного технического университета
- Белавина О.А.** (технический секретарь) кандидат химических наук, заведующий сектором патентования и научно-квалификационной деятельности отдела науки и инноваций Камчатского государственного технического университета
- Артемова Е.Н.** доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии продуктов питания и организации ресторанного дела Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева
- Водинчар Г.М.** кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук
- Голохваст К.С.** доктор биологических наук, профессор РАН, член-корреспондент РАО, директор Сибирского федерального научного центра агrobiотехнологий Российской академии наук
- Йотсукура Н.** доктор философии биологии (Ph.D.), профессор, директор Морской станции Ошоро, научно-исследовательский центр по изучению северной биосферы Университета Хоккайдо (Япония)
- Кадникова И.А.** доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник лаборатории безопасности и качества морского растительного сырья Тихоокеанского научно-исследовательского рыбохозяйственного центра
- Ким Г.Х.** доктор философии биологии (Ph.D.), профессор, заведующий лабораторией альгологии Национального университета Конджу (Республика Корея)

- Климова А.В.** кандидат биологических наук, заведующий сектором коллективного использования научного оборудования научно-образовательного центра «Экология и природопользование» Камчатского государственного технического университета
- Клочкова Н.Г.** доктор биологических наук, главный научный сотрудник Камчатского филиала Тихоокеанского института географии Дальневосточного отделения Российской академии наук
- Лобков Е.Г.** доктор биологических наук, профессор кафедры водных биоресурсов, рыболовства и аквакультуры Камчатского государственного технического университета
- Максимова С. Н.** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии продуктов питания Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета
- Манаков Ю.А.** доктор биологических наук, заместитель директора по научной деятельности Сибирского федерального научного центра агроботехнологий Российской академии наук
- Потапов В.В.** доктор технических наук, главный научный сотрудник Научно-исследовательского геотехнологического центра Дальневосточного отделения Российской академии наук
- Приходько Ю.В.** доктор технических наук, профессор, профессор Передовой инженерной школы «Институт биотехнологий, биоинженерии и пищевых систем» Дальневосточного федерального университета
- Седова Н.А.** доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры водных биоресурсов, рыболовства и аквакультуры Камчатского государственного технического университета
- Сенкевич Ю.И.** доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук
- Токранов А.М.** доктор биологических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник Камчатского филиала Тихоокеанского института географии Дальневосточного отделения Российской академии наук
- Усов А.И.** доктор химических наук, главный научный сотрудник Института органической химии имени Н.Д. Зелинского Российской академии наук
- Швецов В.А.** доктор химических наук, доцент, профессор кафедры энергетических установок и электрооборудования судов Камчатского государственного технического университета

EDITORIAL BOARD

- Klochkova T.A.** Doctor of Biological Sciences, Doctor of Philosophy in Biology (Ph.D.),
(Editor-in-Chief) Professor of Ecology and Nature Management Chair, Kamchatka State
Technical University
- Tzarenko S.N.** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Pro-
(Scientific Editor, fessor of Technical Machines and Equipment Chair, Kamchatka State
technical sciences) Technical University
- Vasilev M.V.** Candidate of Technical Sciences, Captain 1st rank, Head of Military
(Scientific Editor, Training Center of Kamchatka State Technical University
technical sciences)
- Olkhina O.V.** Head of Publishing House, Kamchatka State Technical University
(Executive Secretary)
- Belavina O.A.** Candidate of Chemical Sciences, Head of the Patenting and Scientific
(Technical Secretary) Qualification Activity Sector of Science and Innovation Department,
Kamchatka State Technical University
- Artemova E.N.** Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Food Technology
and Organization of Restaurant Business Chair, Orel State University
named after I.S. Turgenev
- Vodinchar G.M.** Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Leading Scientific Researcher of Institute of Cosmophysical Research
and Radio Wave Propagation of the Far Eastern Branch of Russian
Academy of Sciences
- Golokhvast K.S.** Doctor of Biological Sciences, Professor of Russian Academy of
Sciences, Corresponding Member of Russian Academy of Education,
Director of Siberian Federal Scientific Center for Agrobiotechnologies of
Russian Academy of Sciences
- Yotsukura N.** Doctor of Philosophy in Biology (Ph.D.), Professor, Director of Oshoro
Marine Station, Field Science Center for Northern Biosphere, Hokkaido
University (Japan)
- Kadnikova I.A.** Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Chief Researcher,
Laboratory of Safety and Quality of Marine Plant Materials, Pacific
Research Fisheries Center
- Kim G.H.** Doctor of Philosophy in Biology (Ph.D.), Professor, Head of Phycology
Laboratory, Kongju National University (South Korea)

- Klimova A.V.** Candidate of Biological Sciences, Head of Sector of Collective Use of Scientific Equipment of the Scientific and Educational Center “Ecology and Nature Management”, Kamchatka State Technical University
- Klochkova N.G.** Doctor of Biological Sciences, Chief Scientific Researcher of Kamchatka Branch of the Pacific Institute of Geography of the Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences
- Lobkov E.G.** Doctor of Biological Sciences, Professor of Water Bioresources, Fishery and Aquaculture Chair, Kamchatka State Technical University
- Maksimova S.N.** Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Food Technology Chair of Far Eastern State Technical Fisheries University
- Manakov Yu.A.** Doctor of Biological Sciences, Director Deputy for Scientific work of Siberian Federal Scientific Center for Agrobiotechnologies of Russian Academy of Sciences
- Potapov V.V.** Doctor of Technical Sciences, Chief Scientific Researcher of Research Geotechnological Center of the Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences
- Prikhodko Yu.V.** Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Advanced Engineering School “Institute of Biotechnology, Bioengineering and Food Systems”, Far Eastern Federal University
- Sedova N.A.** Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Professor of Water Bioresources, Fishery and Aquaculture Chair, Kamchatka State Technical University
- Senkevich Y.I.** Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Scientific Researcher of Institute of Cosmophysical Research and Radio Waves Propagation of the Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences
- Tokranov A.M.** Doctor of Biological Sciences, Senior Researcher, Chief Scientific Researcher of Kamchatka Branch of the Pacific Institute of Geography of the Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences
- Usov A.I.** Doctor of Chemical Sciences, Chief Scientific Researcher of N.D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry of Russian Academy of Sciences
- Shvetsov V.A.** Doctor of Chemical Sciences, Associate Professor, Professor of Power Plants and Electrical Equipment of Ships Chair, Kamchatka State Technical University

Содержание

РАЗДЕЛ I. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Царенко С.Н., Зайцев С.А. Оценка количества тепловой энергии при работе упругой муфты судового валопровода	8
Водинчар Г.М., Казаков Е.А. Об одной абстрактной системе управления с памятью в обратной связи	21
Румянцев А.Е., Ефимова М.В., Ефимов А.А. Обоснование применения газообразного диоксида углерода как стабилизатора качества зерна соленой замороженной лососевой икры	33
Ермолаев В.А. Анализ способов сушки спирулины и икры рыб	46
Надвоцкая В.В., Тимофеев В.В. Использование хроматографического анализа для контроля загрязненности поверхностных водных объектов.....	61

РАЗДЕЛ II. БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Касперович Е.В., Бочкарев Н.Ю., Радайкин Е.А. Техногенное влияние полузатопленных и затопленных судов на морские прибрежные воды Камчатки (в том числе Авачинской губы) и Северных Курил	72
Мартыненко Д.О., Позолотина Л.А., Назарова М.А., Климова А.В. Загрязнение нефтепродуктами прибрежных акваторий Авачинской губы (Авачинский залив)	87
Зарипова К.М., Тихонова Е.А. Распределение взвешенных веществ в прибрежных акваториях полуострова Камчатка.....	108
Правила направления, рецензирования и опубликования рукописей статей.....	120
Правила оформления рукописей статей.....	124

Contents

SECTION I. TECHNICAL SCIENCES

Tsarenko S.N., Zaitsev S.A.	
The estimation of thermal energy amount during elastic coupling operation of the ship's shaft line	8
Vodinchar G.M., Kazakov E.A.	
On one abstract control system with memory in feedback.....	21
Rumyantsev A.E., Efimova M.V., Efimov A.A.	
Justification of the carbon dioxide gas use as a stabilizer of grain quality of salted frozen salmon caviar.....	33
Ermolaev V.A.	
Analysis of <i>Spirulina</i> and fish roe drying methods	46
Nadvotskaya V.V., Timofeev V.V.	
Chromatographic analysis application to control surface water bodies pollution.....	61

SECTION II. BIOLOGICAL SCIENCES

Kasperovich E.V., Bochkarev N.Yu., Radaikin E.A.	
Technogenic impact of decommissioned ships on the marine coastal waters of Kamchatka (including the Avacha Bay) and Northern Kurile islands	72
Martynenko D.O., Pozolotina L.A., Nazarova M.A., Klimova A.V.	
Oil products pollution of the Avacha Bay coastal areas (Avachinsky Gulf).....	87
Zaripova K.M., Tikhonova E.A.	
Distribution of suspended matter in the coastal waters of the Kamchatka Peninsula	108
Regulations for manuscript preparation, review and publication.....	120
Manuscripts guidelines.....	124

Научная статья

УДК 539.3/6:629.5

DOI: 10.17217/2079-0333-2025-71-8-20

ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ РАБОТЕ УПРУГОЙ МУФТЫ СУДОВОГО ВАЛОПРОВОДА

Царенко С.Н.¹, Зайцев С.А.²

¹ Камчатский государственный технический университет, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35.

² Испытательная лаборатория крутильных и линейных колебаний ИП «Зайцев С.А.», г. Москва, ул. Рословка, 10.

В работе приведены расчетные зависимости для определения количества тепловой энергии, выделяемой упругой муфтой при крутильных колебаниях валопровода. Валопровод моделируется двухступенчатым стержнем с упругим соединением участков. На валопровод действуют активные силы: со стороны двигателя, представленные частичной суммой ряда Фурье, и усредненное значение момента на винте, а также демпфирующие моменты: со стороны винта, цилиндропоршневой группы и в упругом элементе муфты. Моделирование выполнено для номинальной и резонансной частоты работы двигателя. Установлено, что муфта лучше рассеивает энергию колебаний в условиях негармонического нагружения. Представленный в работе метод расчета тепловой энергии позволяет повысить информативность термометрических данных в системе мониторинга валопровода.

Ключевые слова: валопровод, динамические нагрузки, коэффициент демпфирования, крутильные колебания, метод Фурье, ступенчатый стержень, упругая муфта.

Original article

THE ESTIMATION OF THERMAL ENERGY AMOUNT DURING ELASTIC COUPLING OPERATION OF THE SHIP'S SHAFT LINE

Tsarenko S.N.¹, Zaitsev S.A.²

¹ Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Klyuchevskaya Str. 35

² Testing laboratory of torsional and linear oscillations of IE "Zaitsev S.A.", Moscow, Roslovka Str. 10

The paper presents calculated dependences for determining the amount of thermal energy released by an elastic coupling during torsional vibrations of the shaft line. The shaft line is modeled by a two-stage rod with an elastic connection of the sections. Active forces are acting on the shaft line: on the engine side, represented by the partial sum of the Fourier series and the average value of the torque on the screw, as well as damping moments: on the screw side, the cylinder piston group and in the elastic element of the clutch. The simulation is performed for the nominal and resonant frequency of the engine. It has been found that the coupling dissipates oscillation energy better under non-harmonic loading conditions. The method of calculating thermal energy presented in the paper makes it possible to increase the informative value of thermometric data in the shaft line monitoring system.

Key words: shaft line, dynamic loads, damping coefficient, torsional vibrations, Fourier method, stepped rod, elastic coupling.

ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения стабильной эксплуатации морских и речных судов необходимо осуществлять непрерывный контроль технического состояния элементов судовых энергетических установок (СЭУ). Одной из наиболее ответственных систем СЭУ является машинно-двигательный комплекс (МДК). Внедрение системы мониторинга обосновывается в том числе оценкой рисков возникновения аварий для судовых МДК при развитии опасных колебаний [Горбачев, Покусаев, 2024]. Практика эксплуатации судов показывает, что проблемы, связанные с поломками МДК, могут иметь существенные как экономические, так и экологические последствия [Горбачев, Покусаев, 2024].

На сегодняшний день существует достаточно широкий набор технических средств для отслеживания работоспособности элементов МДК. Анализ напряженно-деформированного состояния непосредственно на узлах валолинии осуществляется за счет тензометрирования [Ефремов, 2007; Dereszewski, 2016; Merono et al., 2014; Горбачев, Колыванов, 2023]. Контроль неравномерности вращения ва-

лопровода проводится с применением индуктивных и магнитных датчиков [Ефремов, 2007; Горбачев, Колыванов, 2023; Feese, Hill, 2002], оптических сенсоров [Ефремов, 2007; Горбачев, Колыванов, 2023; Кудрявцев, 2006], торсиографов [Ефремов, 2007; Горбачев, Колыванов, 2023], акселерометров [Ефремов, 2007; Горбачев, Колыванов, 2023; Костенко, Левенец, 2024]. Средством контроля нормальной работы отдельных элементов валолинии, таких как упругие муфты, демпферы и т. п., является термометрирование [Ефремов, 2007; Арангулов и др., 2020]. На рисунке 1 представлена фотография участка валолинии и ее термограмма, сделанная сотрудником испытательной лаборатории крутильных и линейных колебаний ИП «Зайцев С.А.». Оценка результатов измерения температуры по большей части носит субъективный характер и позволяет выявить проблемы в работе валолинии лишь при значительном изменении величины [Арангулов и др., 2020]. Для повышения информационной ценности данных о температурном состоянии узлов валопровода необходимо понимание тепловых процессов, протекающих в условиях нормальной работы системы.

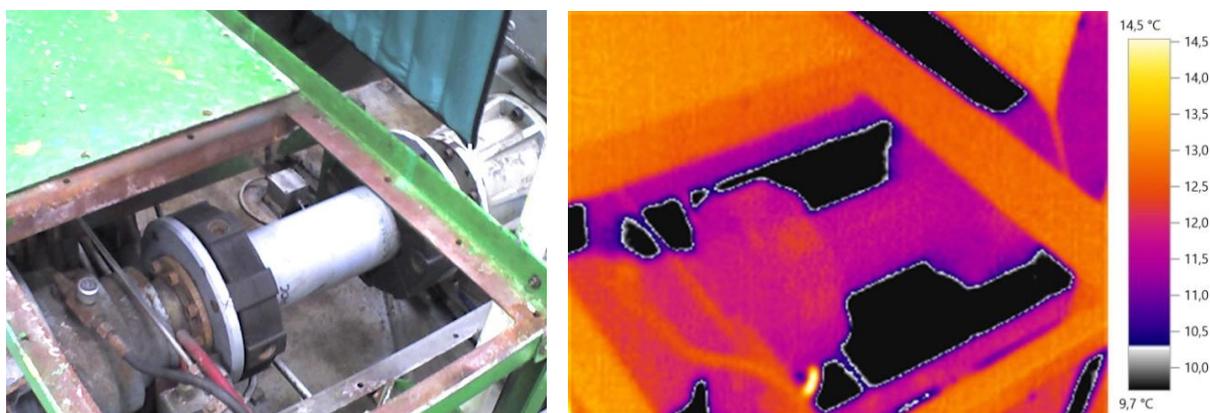


Рис. 1. Фотография участка валолинии и ее термограмма

Fig. 1. Photo of the section of the shaft line and its thermogram

Упругие муфты в судовых энергетических установках предназначены для соединения вращающихся частей валопровода и передачи крутящего момента от двигателя к потребителю. В настоящее время упругие муфты все чаще устанавливаются в главных энергетических установках как морских, так и речных судов, особенно с дизель-редукторными агрегатами и винто-рулевыми колонками. Упругие муфты позволяют компенсировать перекосы и несоосности валов, сгладить динамические нагрузки, вывести опасные частоты крутильных колебаний валопроводной формы за пределы рабочего диапазона частоты вращения главного двигателя.

В правилах Российского морского регистра судоходства [РМРС. Правила..., 2023] и правилах Российского классификационного общества [РКО. Правила..., 2019] к упругим (эластичным) муфтам с точки зрения развития крутильных колебаний предъявляется ряд требований. В том числе требование, что переменный момент в муфте, соответствующие ему напряжения или температура в материале упругого элемента, обусловленные крутильными колебаниями, при длительной работе и при быстром проходе не должны превышать допустимых значений, установленных изготовителем для указанных режимов. При отсутствии данных изготовителя допустимые для длительной работы и быстрого прохода моменты, напряжения или температуры должны определяться по методикам, признанным Регистром.

В ГОСТ 26046-83 «Установки судовые. Общие требования к испытаниям на крутильные колебания» приводятся основные требования к измерительной аппаратуре, в том числе для определения температуры упругой муфты: диапазон измеряемых температур от 0 до 150°C с суммарной погрешностью не более

$\pm 10\%$. Кроме того в ГОСТе указывается, что время измерения температуры должно составлять не менее 15 минут и производиться на всех режимах работы, однако в действительности процесс нагрева упругого элемента муфты может быть более длительным, что приводит к риску недостаточно точной диагностики ее технического состояния.

Ряд специалистов, включая д.т.н. Л.В. Ефремова [Ефремов, 2007], считают, что при измерении деформации муфты достижение температуры упругого элемента величины 50–60°C и более следует считать браковочным показателем. При этом следует учитывать температуру окружающей среды, и величина температуры резиновых элементов муфт на 30–40°C сверх температуры окружающей среды свидетельствует о ее предельной деформации.

Как видно из приведенных правил РМРС и РКО, фактически отсутствуют конкретные значения допустимой температуры материалов упругих муфт, которая возникает при развитии крутильных колебаний и ограничивается требованиями классификационных обществ. Поэтому предварительная расчетная оценка количества теплоты, выделяемой муфтой, позволит получить ожидаемую температуру и оценить степень ее превышения сверх температуры окружающей среды, а соответственно спрогнозировать опасность усталостного разрушения материала муфты.

Целью работы является разработка математической модели для оценки количества тепловой энергии в упругом элементе валопровода, которое генерируется крутильными колебаниями системы, что позволит повысить информативность термометрических измерений при проведении испытаний и в системе автоматизированного мониторинга.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Усилие в упругой линейной муфте (T_M) имеет две составляющие: упругую (M_M) и вязкую ($T_{Мд}$) [Поляков и др., 1979]:

$$T_M = M_M + T_{Мд} = C\Delta\phi + f\Delta\dot{\phi}, \quad (1)$$

где $\Delta\phi$ – угол закручивания упругого элемента;

$\Delta\dot{\phi}_M$ – скорость деформирования упругого элемента;

C – коэффициент жесткости муфты;

f – коэффициент вязкого (внутреннего) трения, определяется через коэффициент демпфирования – ψ [Поляков и др., 1979]:

$$f = \frac{C\psi}{2\pi\omega}, \quad (2)$$

здесь ω – частота колебаний.

Теплообразование в упругом элементе пропорционально среднему за цикл деформирования значению мощности периодических нагрузок [Цысс и др., 2017]. Таким образом, будем полагать, что вся энергия сил вязкого трения переходит в тепловую энергию. Количество теплоты (Q_M), выделяемое на муфте за цикл работы двигателя (2 оборота – для четырехтактного дизельного двигателя, 1 оборот – для

двухтактного), и средняя мощность ($P_{M\text{ ср}}$) вырабатываемой тепловой энергии определяются зависимостями:

$$Q_M = \int_0^{4\pi/\theta} (T_{Мд} \cdot \dot{\phi}) dt = \int_0^{4\pi/\theta} f\dot{\phi}_M^2 dt;$$

$$P_{M\text{ ср}} = \frac{Q_M\theta}{4\pi}. \quad (3)$$

Исследование динамических процессов в упругой муфте выполним на основе двухступенчатого стержня с упругим соединением участков, моделирующего работу валолинии [Царенко и др., 2024]. Расчетная схема валопровода представлена на рисунке 2, здесь: l_1, l – длина первого участка, включает все элементы валопровода до упругой муфты, и длина валолинии в целом соответственно; GJ_{p1}, GJ_{p2} – приведенная жесткость первого и второго участка; $\gamma J_{p1}, \gamma J_{p2}$ – распределенные моменты инерции; I_B – момент инерции винта. В качестве действующих нагрузок рассматриваются: активные моменты на двигателе – $T_{дк}$; крутящий момент на винте – T_B , а также демпфирующие моменты в цилиндропоршневой группе, которые принимаем равномерно распределенными по длине первого участка – $m_{дд}$; демпфирующий момент на винте – $T_{вд}$, дополнительно учитывается демпфирующий момент на муфте – $T_{Мд}$.

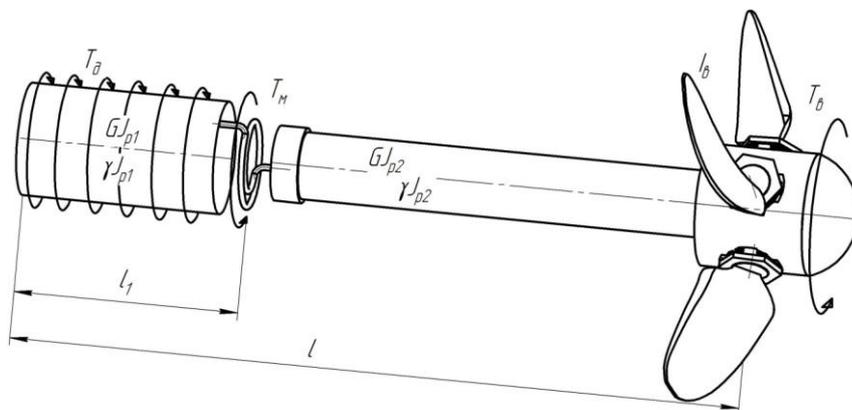


Рис. 2. Расчетная схема валопровода гребного винта с эластичной муфтой

Fig. 2. Design diagram of the propeller shaft line with an elastic coupling

Дифференциальные уравнения углов закручивания для участков вала будут иметь вид:

$$GJ_{p1} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x^2} - \gamma J_{p1} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial t^2} = \sum_{k=1}^{n_{ц}} T_{лк} (x - x_k) + m_{лд};$$

$$GJ_{p2} \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial x^2} - \gamma J_{p2} \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial t^2} = T_{мд} \delta(x - l_1) + T_{в} \delta(x - l) + T_{вд} \delta(x - l), \quad (4)$$

где $\varphi_{1,2}$ – углы закручивания для первого и второго участков соответственно;

x – продольная координата;

x_k – продольная координата соответствующей цилиндропоршневой группы;

t – время;

$n_{ц}$ – количество цилиндров двигателя;

$\delta(x)$ – дельта-функция Дирака.

Граничные условия и условия состыковки участков упругим элементом [Царенко и др., 2024]:

$$GJ_{p1} \varphi_1'(0, t) = 0; GJ_{p2} \varphi_2'(l, t) = -I_e \ddot{\varphi}_2(l, t), \quad (5)$$

$$GJ_{p1} \varphi_1'(l_1, t) = GJ_{p2} \varphi_2'(l_1, t); GJ_{p2} \varphi_2'(l_1, t) = -C(\varphi_2(l_1, t) - \varphi_1(l_1, t)). \quad (6)$$

В соответствии с решением уравнений (4) методом Фурье выражения для углов закручивания и крутящих моментов можно представить в виде:

$$\varphi(z, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n(z) w_n(\tau), \quad (7)$$

$$M(z, \tau) = \frac{GJ_{p1}}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n'(z) w_n(\tau), \quad (8)$$

где $z = x/l$ – относительная продольная координата;

$\tau = tc/l$ – безразмерное время;

$c = \sqrt{GJ_{p1} / \gamma J_{p1}}$ – скорость распространения крутильных волн на первом участке вала;

$\Phi_n(z), \Phi_n'(z)$ – собственные функции и их производные;

$w_n(\tau)$ – функции времени.

Решение граничных задач (4) для собственных функций, а также свойства их ортогональности подробно рассмотрены в статье [Царенко и др., 2024], итоговые расчетные зависимости имеют вид:

– углы закручивания n -й формы колебаний:

$$\varphi_n(z) = \varphi_{0n} \Phi_n(z) = \Phi_{n1}(z) e(\zeta - z) + \Phi_{n2}(z) (e(1 - z) - e(\zeta - z)) = \cos \lambda_n z e(\zeta - z) + ((\cos \lambda_n \zeta - \tilde{e}_\varphi \lambda_n \sin \lambda_n \zeta) \cos(\lambda_n \eta(z - \zeta)) - \frac{\alpha}{\eta} \sin \lambda_n \zeta \sin(\lambda_n \eta(z - \zeta))) \times (e(1 - z) - e(\zeta - z)); \quad (9)$$

– крутящие моменты n -й формы колебаний:

$$M_n(z) = \varphi_{0n} \frac{GJ_{p1}}{l} \Phi_n'(z) = -\varphi_{0n} \frac{GJ_{p1}}{l} \lambda_n (\sin \lambda_n z e(\zeta - z) + \frac{\eta}{\alpha} ((\cos \lambda_n \zeta - \tilde{e}_\varphi \lambda_n \sin \lambda_n \zeta) \sin(\lambda_n \eta(z - \zeta)) + \frac{\alpha}{\eta} \sin \lambda_n \zeta \cos(\lambda_n \eta(z - \zeta)))) \times (e(1 - z) - e(\zeta - z)); \quad (10)$$

– частотное уравнение:

$$(\cos \lambda_n \zeta - \tilde{e}_\varphi \lambda_n \sin \lambda_n \zeta) (\sin(\lambda_n \eta(1 - \zeta)) + \xi \lambda_n \frac{\alpha}{\eta} \cos(\lambda_n \eta(1 - \zeta))) + \frac{\alpha}{\eta} \sin \lambda_n \zeta (\cos(\lambda_n \eta(1 - \zeta)) - \xi \lambda_n \frac{\alpha}{\eta} \sin(\lambda_n \eta(1 - \zeta))) = 0, \quad (11)$$

– весовая функция:

$$\rho(z) = e(\zeta - z) + \frac{1}{\alpha}(e(1 - z) - e(\zeta - z)) + \frac{1}{\eta^2} \xi \delta(z - 1); \quad (12)$$

– квадраты нормы собственных функций для первого участка Δ_{n1}^2 и вала в целом Δ_n^2 :

$$\Delta_{n1}^2 = \frac{1}{2\lambda_n^2} (\lambda_n^2 \zeta \Phi_n^2(\zeta) + \zeta (\Phi_n'(\zeta))^2 - \Phi_n(\zeta) \Phi_n'(\zeta)); \quad (13)$$

$$\Delta_n^2 = \frac{1}{2\lambda_n^2} (\lambda_n^2 \zeta \Phi_n^2(\zeta) + \zeta (\Phi_n'(\zeta))^2 - \Phi_n^{-dz}(\zeta) \Phi_n'(\zeta) + \lambda_n^2 (1 - \zeta) \frac{\eta^2}{\alpha} \Phi_n^2(1) + \alpha (1 - \zeta) (\Phi_n'(1))^2 - \Phi_n(1) \Phi_n'(1) + \Phi_n^{+dz}(\zeta) \Phi_n'(\zeta)) + \xi \Phi_n^2(1). \quad (14)$$

Здесь использованы следующие обозначения:

φ_{0n} – угол закручивания левого торца вала n -й формы колебаний;

$\lambda_n = \omega_n l / c$; ω_n – собственные частоты колебаний;

$\tilde{\epsilon}_\varphi = GJ_{p1} / (Cl)$ – относительная податливость упругого элемента;

$e(z)$ – единичная функция;

$\zeta = l_1 / l$ – относительная длина первого участка вала;

$\xi = I_e / (\gamma J_{p1} l)$ – относительная инерционная нагрузка на правом торце вала;

$\Phi_n^{-dz}(\zeta)$, $\Phi_n^{+dz}(\zeta)$ – значение собственных функций для левого и правого участков вала в сечении ζ ;

$$\eta = \sqrt{(GJ_{p1} \gamma J_{p2}) / (GJ_{p2} \gamma J_{p1})};$$

$$\alpha = GJ_{p1} / GJ_{p2};$$

штрихом обозначена производная по параметру z , точкой – по t .

Подробно рассмотрим частное решение уравнений (4). Действующие на валопровод нагрузки представляются следующими функциями:

– активные моменты на четырехтактном дизельном двигателе:

$$T_d(x, t) = \sum_{k=1}^{n_d} \left(\frac{T_0}{2} + \sum_{j=1}^m T_j \cos \left(\frac{j\theta_b t}{2} + \mu_j + \mu_k \right) \right) \times \delta(x - x_k), \quad (15)$$

где T_j ($j = 0, 1, \dots, m$) – коэффициенты разложения функции моментов в ряд Фурье,

μ_j – фазовая составляющая j -й гармоники,

μ_k – фазовая составляющая угла срабатывания k -го цилиндра;

θ_b – угловая скорость вращения вала;

– демпфирующие моменты в цилиндропоршневой группе определяются по формуле Хольцера [Мартьянов, 2020]:

$$m_{\text{зд}}(t) = 0,04 \omega_n \gamma J_{p1} \frac{\partial \varphi}{\partial t}, \quad 0 \leq x < l_1; \quad (16)$$

– демпфирующий момент на муфте:

$$T_{\text{зд}}(t) = -f \frac{\partial}{\partial t} (\varphi_2(l_1, t) - \varphi_1(l_1, t)); \quad (17)$$

– крутящий момент на винте определяется через средние крутящие моменты в цилиндропоршневой группе:

$$T_b = -n_d T_0 / 2; \quad (18)$$

– демпфирующий момент на винте:

$$T_{\text{вд}}(t) = 2R_c \theta_b \frac{\partial \varphi}{\partial t} \Big|_{x=l}, \quad (18)$$

где $R_c = P_n / \theta_n^3$; P_n , θ_n – номинальная мощность и номинальная угловая скорость на винте.

Подставляя выражения нагрузок (15)–(18) в уравнения (4) с учетом свойства ортогональности собственных функций с весом (12), а также дифференциальных соотношений $\Phi''_{n1} = -\lambda_n^2 \Phi_{n1}$, $\Phi''_{n2} = -\eta^2 \lambda_n^2 \Phi_{n2}$, для ранее принятых обозначений безразмерных величин, получим:

$$\begin{aligned} \ddot{w}_n + 2v_n \dot{w}_n + \lambda_n^2 w_n = & \\ = -\frac{T_0}{2\Delta_n^2} \left(\sum_{k=1}^{n_u} \Phi_n(z_k) - n_{ц} \Phi_n(1) \right) - & \\ -\frac{1}{\Delta_n^2} \sum_{k=1}^{n_u} \Phi_n(z_k) \sum_{j=1}^m \tilde{T}_j \cos\left(\frac{j\tilde{\theta}\tau}{2} + \mu_j + \mu_k\right), & \end{aligned} \quad (19)$$

где $\tilde{T}_j = \frac{T_j l}{(GJ_{p1})}$ – безразмерное амплитудное значение момента для j -й гармоники;

$\tilde{\theta} = \theta_e l / c$ – безразмерная угловая скорость;

декремент затухания v_n примет вид:

$$\begin{aligned} v_n = \frac{R_c \theta_b c \Phi_n^2(1)}{GJ_{p1} \Delta_n^2} + 0,02 \lambda_n \frac{\Delta_{n1}^2}{\Delta_n^2} + & \\ + \frac{\Psi}{4\pi \tilde{e}_\varphi \lambda_n \Delta_n^2} (\Phi_n^{+dz}(\zeta) - \Phi_n^{-dz}(\zeta))^2. & \end{aligned} \quad (20)$$

Частное решение уравнения (19) получено в работе [Царенко и др., 2024]:

$$\begin{aligned} w_n(\tau) = -\frac{\tilde{T}_0}{2\Delta_n^2 \lambda_n^2} \left(\sum_{k=1}^{n_u} \Phi_n(z_k) - n_{ц} \Phi_n(1) \right) - & \\ - \sum_{k=1}^{n_u} \sum_{j=1}^m \frac{\tilde{T}_j \Phi_n(z_k)}{\Delta_n^2 \left(\left(\lambda_n^2 - \left(\frac{j\tilde{\theta}}{2} \right)^2 \right)^2 + v_n^2 (j\tilde{\theta})^2 \right)} \times & \\ \times \left(\left(\lambda_n^2 - \left(\frac{j\tilde{\theta}}{2} \right)^2 \right) \cos\left(\frac{j\tilde{\theta}}{2} \tau + \mu_j + \mu_k\right) + & \right. \\ \left. + v_n j \tilde{\theta} \sin\left(\frac{j\tilde{\theta}}{2} \tau + \mu_j + \mu_k\right) \right). & \end{aligned} \quad (21)$$

Функция для определения скорости деформации будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \dot{w}_n(\tau) = \sum_{k=1}^{n_u} \sum_{j=1}^m \frac{\tilde{T}_j \Phi_n(z_k) j \tilde{\theta}}{2\Delta_n^2 \left(\left(\lambda_n^2 - \left(\frac{j\tilde{\theta}}{2} \right)^2 \right)^2 + v_n^2 (j\tilde{\theta})^2 \right)} \times & \\ \times \left(\left(\lambda_n^2 - \left(\frac{j\tilde{\theta}}{2} \right)^2 \right) \sin\left(\frac{j\tilde{\theta}}{2} \tau + \mu_j + \mu_k\right) - & \right. \\ \left. - v_n j \tilde{\theta} \cos\left(\frac{j\tilde{\theta}}{2} \tau + \mu_j + \mu_k\right) \right). & \end{aligned} \quad (22)$$

Таким образом, демпфирующий момент на муфте с учетом зависимости (17) будет определяться по формуле:

$$T_{мд}(\tau) = \frac{\Psi GJ_{p1}}{2\pi \tilde{e}_\varphi l} \sum_{n=1}^{\infty} (\Phi_n^{+dz}(\zeta) - \Phi_n^{-dz}(\zeta)) \dot{w}_n(\tau). \quad (23)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Моделирование тепловых процессов в упругой муфте проведем на основе конструкции валолинии баржи типа «Сосновка» в состав пропульсивной установки которой входят: главный двигатель Cummins QSM-11, винто-рулевой комплекс SPR-200, эластичная муфта Vulastik L(2611S), разобщающая муфта Schottel, гибкий вал, 4-лопастной винт фиксированного шага. Данная система имеет следующие параметры эквивалентно упругого стержня [Царенко и др., 2024]:

$$\begin{aligned} GJ_{p1} = 4,96 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м}^2; c = 462 \text{ м/с}; \eta = 1,62; & \\ \alpha = 7,17; \tilde{e}_\varphi = 13,6; \xi = 0,124; \zeta = 0,272. & \end{aligned} \quad (24)$$

Значения первых пяти круговых частот колебаний составляют $\omega_n = \lambda_n c / l$:

$$\begin{aligned} \omega_1 = 60,86 \text{ с}^{-1}; \omega_2 = 205 \text{ с}^{-1}; \omega_3 = 432,9 \text{ с}^{-1}; & \\ \omega_4 = 681,9 \text{ с}^{-1}; \omega_5 = 937,7 \text{ с}^{-1}; \dots & \end{aligned} \quad (25)$$

Моменты со стороны цилиндропоршневой группы рассчитаны по индикаторным параметрам работы двигателя и представлены двенадцатью первыми членами ряда Фурье, результаты разложения представлены в таблице.

Согласно паспорту технических данных [VULASTIK L, 2010] эластичная муфта имеет следующие параметры:

– динамическая крутильная жесткость $C = 11,5$ кНм/рад;

– коэффициент демпфирования $\psi = 1,13$;

– допустимая потеря мощности 0,609 кВт.

Рассмотрим работу упругого элемента на частоте двигателя $n_{дв} = 1\,428$ об/мин – максимальная частота двигателя при швартовых испытаниях судна. На графиках рисунков 3–5 представлены: изменение углов закручивания упругого элемента $\Delta\varphi = \varphi(\zeta - dz, \tau) - \varphi(\zeta + dz, \tau)$, демпфирующего момента (23) и мгновенной мощности момента за один цикл работы двигателя, штрихпунктирная линия на графике рисунка 3 соответствует статической составляющей угла закручивания. Выполнив численное интегрирование, находим работу сил вязкого трения (3), которая для рассматриваемого примера составит $Q_m = 0,296$ Дж, что соответствует средней мощности $P_{мсп} = 3,52$ Вт. Таким образом, для рассматриваемого режима работы валопровода потеря мощности на муфте составит менее 1% допустимой величины [VULASTIK L, 2010].

Номинальное значение коэффициента демпфирования ψ определяется в условиях испытания муфты гармонической нагрузкой [Поляков и др., 1979]. Однако по факту для основных режимов работы валопровода момент в упругом элементе не носит гармонического характера (рис. 4 и 5). Поэтому для оценки демпфирующего эффекта на муфте определим среднюю работу сил упругости за четверть цикла нагружения:

$$\bar{A}_{уп} = \frac{C}{16} \sum_{i=1}^{n_3} \Delta\varphi_{ai}^2 = \frac{GJ_{p1}}{16\tilde{e}_\phi l} \sum_{i=1}^{n_3} \Delta\varphi_{ai}^2; \quad (26)$$

где n_3 – количество точек экстремума за цикл нагружения;

$\Delta\varphi_{ai}$ – разница углов закручивания для двух соседних точек экстремума.

Фактическое значение демпфирующего коэффициента можно найти по формуле:

$$\psi_\phi = \frac{Q_m}{A_{уп}}. \quad (27)$$

Для рассматриваемого случая средняя работа сил упругости составляет $\bar{A}_{уп} = 0,061$ Дж, фактическое значение коэффициента демпфирования – $\psi_\phi = 4,86$, что значительно превышает номинальное значение $\psi = 1,13$.

Таблица. Коэффициенты разложения функции моментов в ряд Фурье

Table. Coefficients of decomposition of the function of moments into a Fourier series

$N_{дв}/n_{об}$ (кВт/ мин ⁻¹)	Коэффициент и фаза для j -й гармоники T_j/μ_j (Нм/°)												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
135,2 1428	280 -	298 3,75	354 1,11	327 4,55	56,7 1,99	242 -1,32	106 2,23	154 -1,17	125 2,08	115 -0,95	94 2,4	70,5 -0,52	48,5 2,81
14,7 653	69,3 -	99,2 4,05	148 1,29	163 4,6	109 1,57	141 -1,52	98,8 1,65	100 -1,5	84,1 1,67	73,5 -1,42	61 1,78	48,9 -1,32	39 1,83

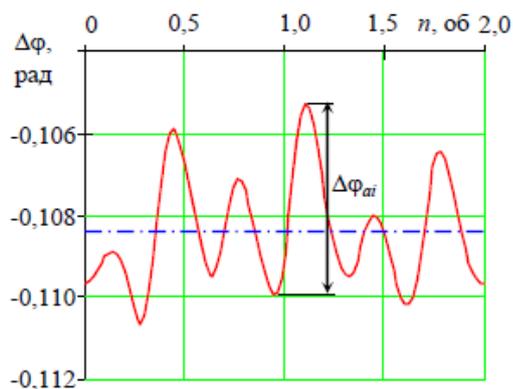


Рис. 3. График угла закручивания упругого элемента муфты при частоте двигателя 1 428 об/мин

Fig. 3. Graph of the twist angle of the elastic coupling element at an engine speed of 1 428 rpm



Рис. 4. График демпфирующего момента в муфте при частоте двигателя 1 428 об/мин

Fig. 4. Graph of the damping torque in the clutch at an engine speed of 1 428 rpm

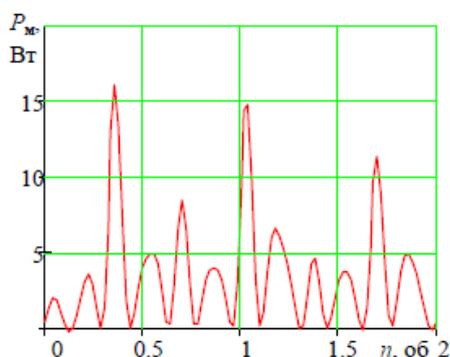


Рис. 5. График мгновенной мощности демпфирующего момента при частоте двигателя 1 428 об/мин

Fig. 5. Graph of the instantaneous damping torque power at an engine speed of 1 428 rpm

Исследуем работу муфты на частоте $n_{дв} = 653$ об/мин, которая соответствует резонансу 3-го порядка 2-й формы колебаний (25). По графикам углов закручивания (рис. 6) и демпфирующих моментов (рис. 7) видно, что характер загрузки упругого элемента близок к гармоническому. Расчетные значения количества тепла, мощности тепловой энергии, работы упругих сил и фактического значения демпфирующего коэффициента составят:

$$Q_M = 13,2 \text{ Дж}; P_{мсп} = 72 \text{ Вт};$$

$$\bar{A}_{уп} = 10,2 \text{ Дж}; \psi_\phi = 1,3.$$

Если в расчетных зависимостях взять только вторую форму колебаний, то значение фактического коэффициента демпфирования совпадет с номинальным.

В практике исследования крутильных колебаний валопровода нередко используют упрощенные модели, ограничиваясь одной или двумя узловыми формами колебаний [Ефремов, 2007; Мартьянов, 2020; Edgar, 2021]. На графике рисунка 8 представлена зависимость влияния количества собственных форм, принятых в модели, на расчетное значение средней мощности. Из графика следует, что упрощение модели до одной или двух степеней свободы может вносить значительную погрешность в результаты расчета.

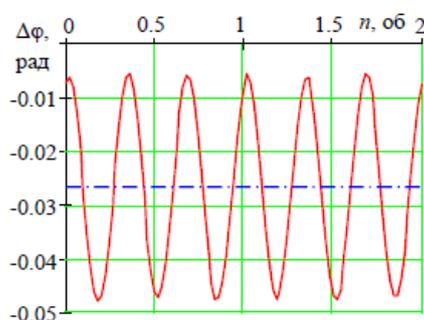


Рис. 6. График угла закручивания упругого элемента муфты при частоте двигателя 653 об/мин

Fig. 6. Graph of the twist angle of the elastic coupling element at an engine speed of 653 rpm

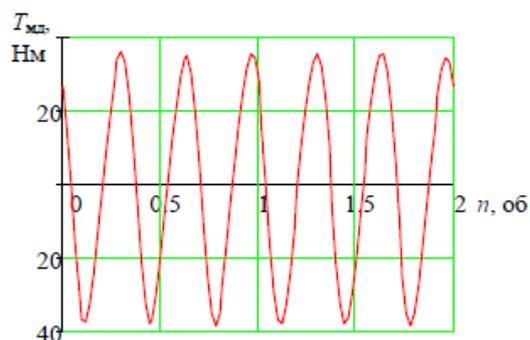


Рис. 7. График демпфирующего момента в муфте при частоте двигателя 653 об/мин

Fig. 7. Graph of the damping torque in the clutch at an engine speed of 653 rpm

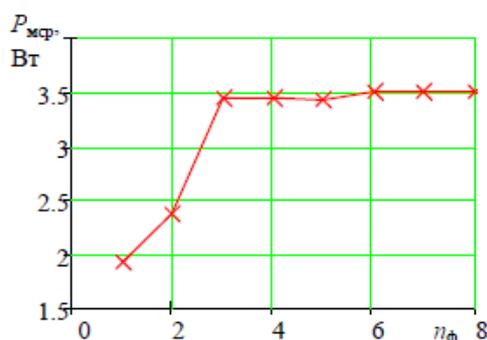


Рис. 8. Зависимость расчетного значения средней мощности от количества собственных форм, принятых в модели

Fig. 8. Dependence of the calculated value of the average power on the number of eigenforms adopted in the model

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты моделирования могут быть использованы для дальнейшего расчета теплового баланса муфты на основе метода конечных элементов [Цыс и др., 2017] или известных теплофизических зависимостей. Также можно выполнить расчет для всего диапазона рабочих частот двигателя, что повысит информативность термометрических данных в системе мониторинга валолинии.

Однако, как было отмечено в статье [Царенко и др., 2024], принятая модель ступенчатого стержня требует дальнейшего развития в направлении совершенство-

вания крутильной схемы, то есть требуется унификация подхода для составления моделей с произвольным количеством участков, учет редуцирующих элементов, разветвленных схем и т. п. Необходимы дополнительные исследования по моделированию действующей нагрузки. Также надо иметь в виду, что источником тепла в муфте могут быть не только крутильные колебания, но и, например, изгибающий момент, возникающий вследствие компенсации несоосности или углового перекоса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена модель крутильных колебаний валопровода с упругим элементом, на основе которой получены расчетные зависимости для оценки количества тепловой энергии, выделяемой муфтой в стационарном режиме работы. Из результатов моделирования следуют выводы:

- попадание частоты работы двигателя в резонанс с одной из собственных форм колебаний может приводить к значительному выделению тепловой энергии на муфте даже в том случае, если резонансная частота не относится к запретному диапазону;
- соотношение количества тепловой энергии муфты, выделяемое при негармоническом нагружении с работой упругих сил, не имеет прямой зависимости с номинальным коэффициентом демпфирования, полученным в условиях гармонической нагрузки;
- аппроксимация модели с распределенными параметрами одноузловой формы колебаний может приводить к значительной погрешности в расчете количества тепловой энергии на муфте.

ЛИТЕРАТУРА

Арангулов, А.С., Николаев, Н.И., Модина М.А. 2020. Оценка теплового рас-

- сеивания силиконовых демпферов высоко- и среднеоборотных двигателей. *Эксплуатация морского транспорта*. № 4. С. 51–57.
- Горбачев М.М., Покусаев М.Н. 2024. Применение матрицы рисков для оценки установки систем мониторинга крутильных колебаний на судах. *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. Т. 16. № 1. С. 109–120.
- Горбачев М.М., Колыванов В.В. 2023. Выбор методов постоянного мониторинга крутильных колебаний в судовых машинно-двигательных комплексах. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. № 2. С. 54–65.
- Ефремов Л.В. 2007. Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий. Санкт-Петербург: Наука. 276 с.
- Кудрявцев М.В. 2006. Оптический мониторинг крутильных колебаний валов. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. Вып. 28. С. 3–7.
- Костенко А.В., Левенец А.В. 2024. Особенности исследования динамических характеристик судового валопровода. *Вестник ТОГУ*. № 3 (74). С. 7–14. DOI: 10.38161/1996-3440-2024-3-7-14.
- Мартьянов В.В. 2020. Оценка угрозы возникновения резонансных колебаний на примере расчета крутильных колебаний судового валопровода пассажирского теплохода пр. Р118. *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. Т. 12. № 2. С. 359–368. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-359-368.
- Российский морской регистр судоходства (РМРС). 2023. Правила классификации и постройки морских судов. Часть VII. Механические установки. Санкт-Петербург: РМРС. 115 с.
- Российское классификационное общество (РКО). 2019. Правила классификации и постройки судов (ПКПС). Москва: РКО. 1685 с.
- Поляков В.С., Барбаш И.Д., Ряховский О.А. 1979. Справочник по муфтам. Ленинград: Машиностроение. 344 с.
- Царенко С.Н., Зайцев С.А., Корж А.С., 2024. Вынужденные колебания валопровода на основе модели двухступенчатого стержня с упругим соединением участков. *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. Т. 16. № 4. С. 507–518. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-4-507-518
- Цысс В.Г., Строков В.М., Сергаева М.Ю. 2017. Конечно-элементный анализ теплового состояния упругой звукоизолирующей муфты. *Динамика систем, механизмов и машин*. Т. 5. № 1. С. 75–84. DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-1-84-88.
- VULASTIK L. Технические данные. 2010. URL: https://www.sudo.ru/data/doctxt/data/produksiya/ob_vulkan/vulastik_1_ltd/file/vulastik_1_ltd.pdf (дата обращения: 10.10.2022).
- Dereszewski M. 2016. Test stand for monitoring of torsional vibration of engine's crankshaft by instantaneous angular speed measurement. *Zeszyty naukowe Akademii morskiej w Gdyni*. № 96, grudzień. P. 15–23.
- Edgar G. 2021. Villamarín. Torsional vibration solution using symbolic transfer matrices. DOI: 10.13140/RG.2.2.28988.16004. URL: https://www.researchgate.net/publication/355860158_Torsional_vibration_solution_using_symbolic_transfer_matrices (дата обращения: 10.10.2024).

- Feese T., Hill C. 2002. Guidelines for preventing torsional Vibration Problems in reciprocating Machinery. Engineering Dynamics Incorporated. Nashville. 48 p.
- Merono P.A., Gomez F.C., Marin F. 2014. Measurement Techniques of Torsional Vibration in Rotating Shafts. *Tech Science Press, CMC*. Vol. 44. № 2. P. 85–104.

REFERENCES

- Arangulov A.S., Nikolaev N.I., Modina M.A. 2020. Evaluation of thermal dissipation of silicone dampers of high- and medium-speed engines. *Ekspluatatsiya morskogo transporta (Operation of Marine Transport)*. № 4. P. 51–57 (in Russian).
- Gorbachev M.M., Pokusaev M.N. 2024. Application of the risk matrix for assessing the installation of torsional vibration monitoring systems on ships. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova (Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of Marine and River Fleet)*. Vol. 16. № 1. P. 109–120 (in Russian).
- Gorbachev M.M., Kolyvanov V.V. 2023. The choice of methods for continuous monitoring of torsional vibrations in marine engine-propulsion complexes. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Morskaja tehnika i tehnologija (Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies)*. № 2. P. 54–65 (in Russian).
- Efremov L.V. 2007. Theory and practice of research on torsional vibrations of power plants using computer technology. St. Petersburg: Nauka Publ. 276 p. (in Russian).
- Kudryavtsev M.V. 2006. Optical monitoring of torsional vibrations of shafts. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki (Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics)*. P. 3–7 (in Russian).
- Kostenko A.V., Levenets A.V. 2024. Features of the study of the dynamic characteristics of the ship's shaft pipeline. *Vestnik TOGU (Bulletin of Pacific National University (Bulletin of the TOGU))*. № 3 (74). P. 7–14. DOI: <https://doi.org/10.38161/1996-3440-2024-3-7-14> (in Russian).
- Martianov V.V. 2020. Assessment of the threat of resonant vibrations by the example of calculating torsional vibrations of the ship's shaft line of the passenger ship ave. R118. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova (Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of Marine and River Fleet)*. Vol. 12. № 2. P. 359–368. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-359-368 (in Russian).
- Russian Maritime Register of Shipping (RMRS). 2023. Rules for the classification and construction of naval vessels. Part VII. Mechanical installations. St. Petersburg: RMRS Publ. 115 p. (in Russian).
- The Russian Classification Society (RKO). 2019. Rules for the classification and construction of ships (PKPS). Moscow: RKO Publ. 1685 p. (in Russian).
- Polyakov V.S., Barbash I.D., Ryakhovsky O.A., 1979. Handbook of couplings. Leningrad: Mechanical engineering Publ. 344 p. (in Russian).
- Tsarenko S.N., Zaitsev S.A., Korzh A.S. 2024. Forced vibrations of a shaft pipeline based on a model of a two-stage rod with an elastic connection of sections. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova (Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of Marine and River Fleet)*. Vol. 16. № 4.

- P. 507-518. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-4-507-518 (in Russian).
- Tsyss V.G., Stokov V.M., Sergaeva M.Yu. 2017. Finite element analysis of the thermal state of an elastic soundproof coupling. *Dinamika system, mehanizmov i mashin (Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines)*. Vol. 5. № 1. P. 75-84. DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-1-84-88 (in Russian).
- Vulastik L. Technical data, 2010. URL https://www.sudo.ru/data/doctxt/data/produksiya/ob_vulkan/vulastik_1_ltd/file/vulastik_1_ltd.pdf / (accessed: 10.10.2022) (in Russian).
- Dereszewski M. 2016. Test stand for monitoring of torsional vibration of engine's crankshaft by instantaneous angular speed measurement. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni*. № 96, grudzień. P. 15-23.
- Edgar G., 2021. Villamarín. Torsional vibration solution using symbolic transfer matrices. DOI: 10.13140/RG.2.2.28988.16004. URL: https://www.researchgate.net/publication/355860158_Torsional_vibration_solution_using_symbolic_transfer_matrices (accessed: 10.10.2024).
- Feese T., Hill C. 2002. Guidelines for preventing torsional Vibration Problems in reciprocating Machinery. Engineering Dynamics Incorporated. Nashville. 48 p.
- Merono P.A., Gomez F.C., Marin F. 2014. Measurement Techniques of Torsional Vibration in Rotating Shafts. *Tech Science Press, CMC*. Vol. 44. № 2. P. 85-104.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Царенко Сергей Николаевич – Камчатский государственный технический университет; 683003, Россия, Петропавловск-Камчатский; доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование»; tzarenko@rambler.ru. SPIN-код: 4554-4579, Author ID: 758077; Scopus ID: 56596593600.

Tsarenko Sergey Nikolaevich – Kamchatka State Technical University; 683003, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associated Professor, Professor of Technological machines and equipment Chair; tzarenko@rambler.ru. SPIN-code: 4554-4579, Author ID: 758077; Scopus ID: 56596593600.

Зайцев Сергей Анатольевич – Испытательная лаборатория крутильных и линейных колебаний ИП «Зайцев С.А.»; 125222, Россия, Москва; руководитель; zaytsev_regpg@mail.ru.

Zaitsev Sergey Anatolyevich – Testing Laboratory of Torsional and Linear Oscillations of IP “Zaitsev S.A.”; 125222, Russia, Moscow; Head; zaytsev_regpg@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 13.11.2024; одобрена после рецензирования 27.12.2024; статья принята к публикации: 20.03.2025.

The article was submitted 13.11.2024; approved after reviewing 27.12.2024; accepted for publication 20.03.2025.

Для цитирования: Царенко С.Н., Зайцев С.А. 2025. Оценка количества тепловой энергии при работе упругой муфты судового валопровода. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. Вып. 71. С. 8-20. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2025-71-8-20>.

For citation: Tsarenko S.N., Zaitsev S.A. 2025. The estimation of thermal energy amount during elastic coupling operation of the ship's shaft line. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta (Bulletin of Kamchatka State Technical University)*. Iss. 71. P. 8-20. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2025-71-8-20>.

Научная статья

УДК 517.91/93:519.642.2

DOI: 10.17217/2079-0333-2025-71-21-32

ОБ ОДНОЙ АБСТРАКТНОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ С ПАМЯТЬЮ В ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Водинчар Г.М., Казаков Е.А.

Камчатский государственный технический университет, г. Петропавловск-Камчатский,
ул. Ключевская, 35.

Многие реальные управляемые системы произвольной природы обладают свойством памяти – когда будущие состояния невозможно спрогнозировать без учета того, как система пришла в актуальное состояние. При математическом описании этот эффект может проявляться как в уравнениях состояния, так и в выражениях для управления с обратной связью. Характерным признаком памяти является наличие интегральных операторов типа Вольтерры в уравнениях системы. В работе исследованы некоторые свойства интегро-дифференциальных уравнений, описывающих один класс абстрактных систем управления с памятью в обратной связи. Доказано существование и единственность решения уравнений системы, показана невозможность разрушения решения за конечное время (blow-up) в линейном случае. Выделен класс ядер функционала обратной связи, допускающий переход к модели без памяти, за счет введения дополнительных управлений.

Ключевые слова: интегро-дифференциальные уравнения, наследственная динамика, обратная связь, память, системы управления.

Original article

ON ONE ABSTRACT CONTROL SYSTEM WITH MEMORY IN FEEDBACK

Vodinchar G.M., Kazakov E.A.

Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Klyuchevskaya Str. 35.

Many real control systems of different nature have the property of memory – when future states cannot be predicted without taking into account how the system arrived at the current state. In mathematical description, this effect can indicate itself both in the equations of state and in expressions for feedback control. A characteristic feature of memory is the presence of integral operators of the Volterra type in the system equations. In this paper, some properties of integro-differential equations describing one class of abstract control systems with memory in feedback are investigated. The existence and uniqueness of a solution to the system equations are proved, and the impossibility of blowing up the solution in a finite time in the linear case is shown. A class of feedback kernels is identified that allows a transition to a memoryless model due to the introduction of additional controls.

Key words: integro-differential equations, hereditary dynamics, feedback, memory, control systems.

ВВЕДЕНИЕ

При математическом описании систем управления в пространстве состояний обычно задается уравнение, связывающее скорости изменения переменных состояния $x_i(t)$ с самими этими переменными и управлениями $u_j(t)$ в данный момент времени [Ким, 2004]. Если управления являются заданными функциями времени $u_j(t) = \varphi_j(t)$, говорят о программном управлении, если же управления определяются полностью или частично переменными состояниями, т. е. $u_j(t) = \varphi_j(t, x_1(t), x_2(t), \dots)$, говорят об управлении с обратной связью. Принципиально в таких системах то, что уравнения связывают только одновременные значения переменных состояния, скоростей их изменения и управлений. Поэтому такие системы являются системами без памяти. Отсутствие памяти означает, что если известно состояние системы в какой-либо момент времени, то при заданном управлении, т. е. заданной зависимости φ_j от t , будущие состояния системы однозначно определены.

В более общем случае в реальной системе произвольной природы могут быть ситуации, когда актуальное состояние и будущая динамика определяются не только состоянием системы сейчас, но и предыдущими состояниями и управлениями. Подобные системы называют системами с памятью, наследственными системами или эредитарными системами по терминологии Вито Вольтерры [Вольтерра, 1976], который одним из первых начал рассматривать математическое описание таких систем. В таких системах скорости изменения переменных состояния, т. е. их производные по времени, выражаются не заданными функциями от актуальных значений этих переменных и управлений,

а функционалами от актуальных и предыдущих значений состояний и управлений. К таким системам относятся и системы управления с памятью в обратной связи, когда актуальное значение управлений определяется функционалом от настоящего и прошлых состояний.

В математических моделях наиболее общим способом задания функционалов являются интегральные конструкции, поэтому для описания систем с памятью обычно используют аппарат интегральных и/или интегро-дифференциальных уравнений [Вольтерра, 1976, 1982; Maleknejad, Ebrahimzadeh, 2014]. В последние десятилетия для описания таких систем также успешно применяют формализм дробных производных [Учайкин, 2008; Sweilam, Al-Mekhlafi, 2016; Ali et al., 2016; Yang et al., 2024]. При этом необходимо отметить, что при любом из известных вариантов определения дробной производной она является некоторым интегральным или интегро-дифференциальным оператором со специфическим ядром. Поэтому и такой вариант описания сводится в конечном счете к интегро-дифференциальным уравнениям. На основе дробных производных камчатским математиком Р.И. Паровиком активно развивается теория дробных осцилляторов – базовой математической модели эредитарных колебательных систем [Parovik, 2020; Паровик, 2020]. Достаточно глубоко разработана и теория динамических систем, в том числе технических, представляемых только интегральными уравнениями [Яценко, 1991; Апарцин, 1999; Sidorov, 2011; Сидоров, 2011].

В настоящей работе описываются некоторые свойства абстрактной системы управления с эредитарной обратной связью. Данная система является сильным математическим обобщением двумерной динамической системы, которая была полу-

чена и изучена авторами настоящей статьи ранее, как модель двумодового гидромагнитного динамо с памятью [Vodinchar, 2020; Казаков, 2022; Водинчар, Казаков, 2023]. Управление с обратной связью в этой исходной физической системе представляло собой действие силы Лоренца на мелкомасштабный турбулентный генератор магнитного поля.

В работе доказывалось существование и единственность решений уравнений системы, обсуждается вопрос разрушения решения за конечное время (эффект blow-up). Выделяется частный случай системы, когда удается исключить интегральный член и свести уравнения системы к дифференциальным.

Необходимо отметить, что при рассмотрении неэредитарных систем, исключение из рассмотрения (скрытие) части переменных приводит к появлению в модели членов, отражающих предысторию такой редуцированной системы [Учайкин, 2008]. Поэтому эредитарность зачастую является не столько свойством реальной системы, сколько ее конкретной модели. Если модель не учитывает важных для описания скрытых переменных – она оказывается эредитарной. Учет же этих переменных может снять эредитарность. В конечном счете многие конечномерные интегро-дифференциальные системы уравнений можно записать как дифференциальные, но бесконечномерные (возможно, что и континуум-мерные). Поэтому упомянутое выше исключение интегрального члена для некоторых частных случаев описываемой системы – это не что иное, как обратный процесс выделения скрытых переменных.

Формальное описание системы

Будем рассматривать систему управления абстрактным объектом, состояние

которого описывается n -мерным фазовым вектором $\mathbf{x}(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))^T$ и контролируется r -мерным вектором управления $\mathbf{u}(t) = (u_1(t), u_2(t), \dots, u_r(t))^T$, где T – символ транспонирования. Уравнение состояния объекта имеет вид:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t), \quad (1)$$

где $\mathbf{f} = (f_1, f_2, \dots, f_n)^T$ – заданная вектор-функция своих аргументов, Липшиц-непрерывная в области X допустимых состояний и временного интервала управления.

Управление объектом носит характер управления с обратной связью, причем выражение управления через состояния имеет вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(t) &= \int_0^t \mathbf{K}(t-\tau) \mathbf{q}(\mathbf{x}(\tau), \tau) d\tau = \\ &= \int_0^t \mathbf{K}(s) \mathbf{q}(\mathbf{x}(t-s), t-s) ds, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_m)^T$ – заданная m -мерная вектор-функция своих аргументов, Липшиц-непрерывная в области U допустимых управлений и временного интервала управления, а $\mathbf{K}(\cdot)$ – заданная матричная функция (ядро) размерности $r \times m$. Аналитические свойства этого ядра опишем ниже. Интегралы в выражении (2) тождественно равны, легко переводятся друг в друга заменой переменной интегрирования $t-\tau = s$, и мы будем использовать из соображений удобства тот или иной вариант представления $\mathbf{u}(t)$.

Из правой части равенства (2) хорошо видно, что актуальное управление $\mathbf{u}(t)$ является непрерывной линейной комбинацией

(взвешенной суммой) значений заданной функции \mathbf{q} от актуального и всех предшествующих состояний системы. Это означает, что обратная связь обладает памятью или свойством эредитарности, а функция $\mathbf{K}(\cdot)$ задает плотность распределения коэффициентов (весов) этой комбинации.

В данной работе будем понимать нормы векторов и матриц в следующем смысле:

$$\begin{aligned} \|\mathbf{q}\| &= \max_{i=1,\dots,m} |q_i| \text{ и} \\ \|\mathbf{K}\| &= \max_{i=1,\dots,r} \sum_{j=1}^m |K_{i,j}|. \end{aligned} \quad (3)$$

Отметим, что при таком определении матричная норма является операторной для нормы векторов, а значит и подчиненной ей, т. е. $\|\mathbf{Kq}\| \leq \|\mathbf{K}\| \cdot \|\mathbf{q}\|$.

Считаем, что ядро $\mathbf{K}(\cdot)$ ограничено по норме на положительной полуоси константой $M > 0$, т. е. $\|\mathbf{K}(s)\| \leq M$ для любого $s \geq 0$, и абсолютно интегрируемо на этой полуоси, т. е.

$$\int_0^{+\infty} \|\mathbf{K}(s)\| ds = I < +\infty. \quad (4)$$

Отметим, что это влечет собой ограниченность и абсолютную интегрируемость всех элементов этого матричного ядра.

Уравнения (1), (2), описывающие систему управления, необходимо еще замкнуть начальными условиями на состояние в виде $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}^0$. Для того чтобы эти интегро-дифференциальные уравнения корректно описывали объект, необходимо прежде всего убедиться в существовании и единственности решения системы ((1), (2)) при заданных начальных условиях.

Существование и единственность решения

Прежде всего, хорошо известно, что дифференциальное уравнение вида (1) вместе с начальными условиями $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}^0$ равносильны интегральному уравнению

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}^0 + \int_0^t \mathbf{f}(\mathbf{x}(\tau), \mathbf{u}(\tau), \tau) d\tau. \quad (5)$$

Введем дополнительную фазовую переменную $x_0 = t$ и следующие блочные векторы и матрицы:

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \begin{bmatrix} x_0 \\ \mathbf{x} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix}, \mathbf{g} = \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{f} \\ \mathbf{q} \end{bmatrix}, \mathbf{y}^0 = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{x}^0 \\ \mathbf{0}_r \end{bmatrix}, \\ \mathbf{J} &= \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{(n+1) \times (n+1)} & \mathbf{0}_{(n+1) \times m} \\ \mathbf{0}_{r \times (n+1)} & \mathbf{K} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (6)$$

где символом $\mathbf{0}$ обозначены нулевые вектор и матрицы, а символом \mathbf{E} обозначена единичная матрица. Нижние индексы обозначают размерности соответствующих матричных и векторных объектов. Тогда уравнения (2) и (5) будут равносильны одному нелинейному интегральному уравнению Вольтерры

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{y}^0 + \int_0^t \mathbf{J}(t - \tau) \mathbf{g}(\mathbf{y}(\tau)) d\tau \quad (7)$$

с неизвестной функцией $\mathbf{y}(t)$. Поэтому вопрос о существовании и единственности решения уравнений объекта управления равносильно аналогичному вопросу для уравнения (7).

Отметим, что $\|\mathbf{J}(s)\| = \max\{1, \|\mathbf{K}(s)\|\} \leq 1 + M = M_1$, ядро $\mathbf{J}(s)$ абсолютно интег-

рируемо на $[0; +\infty)$, а функция $\mathbf{g}(\mathbf{y})$ Липшиц-непрерывна в области допустимых состояний-управлений $X \times U$ с липшицевой константой L .

Рассмотрим более общее уравнение вида

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{y}^s + \int_{t_s}^t \mathbf{J}(t-\tau) \mathbf{g}(\mathbf{y}(\tau)) d\tau \quad (8)$$

на отрезке $[t_s; T]$, где $t_s \geq 0$ и $T > t_s$. Считаем, что числа t_s и T таковы, что $\mathbf{y}(t) \in X \times U$ для любого момента времени из $[t_s; T]$.

Для доказательства существования и единственности решения уравнения (8) будем использовать принцип неподвижной точки. Введем в рассмотрение пространство $C_{[t_s; T]}$ непрерывных на отрезке $[t_s; T]$ вектор-функций с расстоянием

$$d(\mathbf{y}(t), \hat{\mathbf{y}}(t)) = \sup_{t_s \leq t \leq T} \|\mathbf{y}(t) - \hat{\mathbf{y}}(t)\|, \quad (9)$$

где норма понимается в смысле (3) и оператор Φ , определяемый равенством

$$\Phi \mathbf{y}(t) = \mathbf{y}^s + \int_{t_s}^t \mathbf{J}(t-\tau) \mathbf{g}(\mathbf{y}(\tau)) d\tau. \quad (10)$$

Тогда уравнение (8) запишется в операторной форме $\mathbf{y}(t) = \Phi \mathbf{y}(t)$.

Выделим в пространстве множество $\Omega = \{\mathbf{y}(t) | d(\mathbf{y}(t), \mathbf{y}^s) \leq \delta\}$, т. е. замкнутую δ -окрестность точки \mathbf{y}^s , и пусть также $S = \sup_{\mathbf{y} \in \Omega} \|\mathbf{g}(\mathbf{y})\|$. Покажем, что существует такое $t_{s+1} \in (t_s; T)$, что для $t \in [t_s; t_{s+1}]$ оператор Φ переводит множество Ω в себя. Для этого оценим выражение $\|\Phi \mathbf{y} - \mathbf{y}^s\|$, используя сначала стандартные свойства интеграла и подчиненной матричной нормы:

$$\begin{aligned} \|\Phi \mathbf{y}(t) - \mathbf{y}^s\| &= \left\| \int_{t_s}^t \mathbf{J}(t-\tau) \mathbf{g}(\mathbf{y}(\tau)) d\tau \right\| \leq \\ &\leq \int_{t_s}^t \|\mathbf{J}(t-\tau) \mathbf{g}(\mathbf{y}(\tau))\| d\tau \leq \\ &\leq \int_{t_s}^t \|\mathbf{J}(t-\tau)\| \cdot \|\mathbf{g}(\mathbf{y}(\tau))\| d\tau \leq \\ &\leq \int_{t_s}^t M_1 \cdot \|\mathbf{g}(\mathbf{y}(\tau))\| d\tau = M_1 \int_{t_s}^t \|\mathbf{g}(\mathbf{y}(\tau))\| d\tau \leq \\ &\leq M_1 \int_{t_s}^t S d\tau = M_1 S (t - t_s). \end{aligned} \quad (11)$$

Тогда ясно, что при $t_{s+1} = t_s + \delta / (M_1 S)$ получим, что оператор Φ переводит множество Ω в себя, если $t \in [t_s; t_{s+1}]$.

Отметим, что величина отрезка $[t_s; t_{s+1}]$ связана со скоростью роста функции $\mathbf{g}(\mathbf{y})$ в области Ω . Чем стремительней растет эта функция, тем короче отрезок.

Теперь покажем, что достаточно высокая степень оператора Φ является сжимающим отображением. Оценим для этого

$$\begin{aligned} \|\Phi \mathbf{y}(t) - \Phi \hat{\mathbf{y}}(t)\| &= \left\| \int_{t_s}^t \mathbf{J}(t-\tau) \mathbf{g}(\mathbf{y}(\tau)) d\tau - \right. \\ &\left. - \int_{t_s}^t \mathbf{J}(t-\tau) \mathbf{g}(\hat{\mathbf{y}}(\tau)) d\tau \right\| \leq \int_{t_s}^t \|\mathbf{J}(t-\tau) [\mathbf{g}(\mathbf{y}(\tau)) - \\ &- \mathbf{g}(\hat{\mathbf{y}}(\tau))]\| d\tau \leq \int_{t_s}^t \|\mathbf{J}(t-\tau)\| \cdot \|\mathbf{g}(\mathbf{y}(\tau)) - \\ &- \mathbf{g}(\hat{\mathbf{y}}(\tau))\| d\tau \leq M_1 \int_{t_s}^t \|\mathbf{g}(\mathbf{y}(\tau)) - \mathbf{g}(\hat{\mathbf{y}}(\tau))\|. \end{aligned} \quad (12)$$

Используя теперь Липшиц-непрерывность функции $\mathbf{g}(\mathbf{y})$ и продолжая оценки (12), получим

$$\begin{aligned} \|\Phi \mathbf{y}(t) - \Phi \hat{\mathbf{y}}(t)\| &\leq \\ &\leq M_1 L \int_{t_s}^t \|\mathbf{y}(\tau) - \hat{\mathbf{y}}(\tau)\| d\tau. \end{aligned} \quad (13)$$

Далее по свойствам интегралов и верхних граней:

$$\begin{aligned} \|\Phi \mathbf{y}(t) - \Phi \hat{\mathbf{y}}(t)\| &\leq \sup_{t_s \leq t \leq T} \|\Phi \mathbf{y}(t) - \Phi \hat{\mathbf{y}}(t)\| \leq \\ &\leq \sup_{t_s \leq t \leq T} M_1 L \int_{t_s}^t \|\mathbf{y}(\tau) - \hat{\mathbf{y}}(\tau)\| d\tau \leq \\ &\leq M_1 L \int_{t_s}^t \sup_{t_s \leq \tau \leq T} \|\mathbf{y}(\tau) - \hat{\mathbf{y}}(\tau)\| d\tau \leq \\ &\leq M_1 L \int_{t_s}^t d(\mathbf{y}, \hat{\mathbf{y}}) d\tau = M_1 L d(\mathbf{y}, \hat{\mathbf{y}}) \cdot (t - t_s). \end{aligned} \quad (14)$$

Теперь оценим норму $\|\Phi^2 \mathbf{y}(t) - \Phi^2 \hat{\mathbf{y}}(t)\|$, используя (13) и (14):

$$\begin{aligned} \|\Phi^2 \mathbf{y}(t) - \Phi^2 \hat{\mathbf{y}}(t)\| &\leq \sup_{t_s \leq t \leq T} \|\Phi^2 \mathbf{y}(t) - \Phi^2 \hat{\mathbf{y}}(t)\| \leq \\ &\leq \sup_{t_s \leq t \leq T} M_1 L \int_{t_s}^t \|\Phi \mathbf{y}(\tau) - \Phi \hat{\mathbf{y}}(\tau)\| d\tau \leq \\ &\leq M_1 L \int_{t_s}^t M_1 L d(\mathbf{y}, \hat{\mathbf{y}})(\tau - t_s) d\tau = \\ &= M_1^2 L^2 d(\mathbf{y}, \hat{\mathbf{y}}) \int_{t_s}^t (\tau - t_s) d\tau = \\ &= M_1^2 L^2 d(\mathbf{y}, \hat{\mathbf{y}}) \cdot \frac{(t - t_s)^2}{2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Из этой оценки далее аналогично легко получить, что

$$\begin{aligned} \|\Phi^3 \mathbf{y}(t) - \Phi^3 \hat{\mathbf{y}}(t)\| &\leq \\ &\leq M_1^3 L^3 d(\mathbf{y}, \hat{\mathbf{y}}) \cdot \frac{(t - t_s)^3}{6} \end{aligned} \quad (16)$$

и, продолжая далее, что для произвольного натурального k :

$$\begin{aligned} \|\Phi^k \mathbf{y}(t) - \Phi^k \hat{\mathbf{y}}(t)\| &\leq \\ &\leq M_1^k L^k d(\mathbf{y}, \hat{\mathbf{y}}) \cdot \frac{(t - t_s)^k}{k!}. \end{aligned} \quad (17)$$

В таком случае

$$\begin{aligned} d(\Phi^k \mathbf{y}(t), \Phi^k \hat{\mathbf{y}}(t)) &= \\ &= \sup_{t_s \leq t \leq T} \|\Phi^k \mathbf{y}(t) - \Phi^k \hat{\mathbf{y}}(t)\| \leq \\ &\leq \sup_{t_s \leq t \leq T} M_1^k L^k d(\mathbf{y}, \hat{\mathbf{y}}) \cdot \frac{(t - t_s)^k}{k!} = \\ &= M_1^k L^k d(\mathbf{y}, \hat{\mathbf{y}}) \cdot \frac{(T - t_s)^k}{k!}. \end{aligned} \quad (18)$$

Выражение $M_1^k L^k (T - t_s)^k / k!$ бесконечно малое при $k \rightarrow +\infty$, поэтому обязательно существует натуральное k_0 и вещественное $\alpha \in (0; 1)$ такие, что $d(\Phi^{k_0} \mathbf{y}, \Phi^{k_0} \hat{\mathbf{y}}) \leq \alpha d(\mathbf{y}, \hat{\mathbf{y}})$. Это означает, что k_0 -я степень оператора Φ является сжимающим отображением. Тогда этот оператор имеет единственную неподвижную точку $\tilde{\mathbf{y}}$, являющуюся решением операторного уравнения $\mathbf{y} = \Phi \mathbf{y}$.

Итак, существует отрезок времени $[t_s; t_{s+1}]$, на котором уравнение (8) имеет единственное решение $\mathbf{y}(t) = \tilde{\mathbf{y}}_s(t)$. Обозначим $\tilde{\mathbf{y}}_s(t_{s+1})$ через \mathbf{y}^{s+1} и рассмотрим уравнение

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{y}^{s+1} + \int_{t_{s+1}}^t \mathbf{J}(t - \tau) \mathbf{g}(\mathbf{y}(\tau)) d\tau \quad (19)$$

полностью аналогично уравнению (8). Для него также будет иметь место отрезок $[t_{s+1}; t_{s+2}]$ существования и единственности решения $\mathbf{y}(t) = \tilde{\mathbf{y}}_{s+1}(t)$. При этом решение $\tilde{\mathbf{y}}_s(t)$ будет гладко переходить в решение $\tilde{\mathbf{y}}_{s+1}(t)$ при $t = t_{s+1}$, причем ввиду единственности решений это продолжение также будет единственным. Сшивая подобным образом решения, начиная с $t_0 = 0$, получаем существование и единственность

решения уравнения на временном промежутке $[0; t_\infty) = \bigcup_{s=0}^{\infty} [t_s; t_{s+1}]$.

Выше уже упоминалось, что размер отрезка $[t_s; t_{s+1}]$ связан со скоростью роста $\|\mathbf{g}\|$. Поэтому возможна ситуация, когда по мере продолжения решений верхняя грань $\|\mathbf{g}\|$ будет становиться все больше, т. е. величины отрезков будут уменьшаться, в пределе до нуля. В этом случае точка T^* является конечной.

В подобной ситуации происходит разрушение решения (blow-up) в данной точке. Более точно, говорят, что решение $\tilde{\mathbf{y}}(t)$ уравнения (7) разрушается в некоторой конечной точке T^* , если $\tilde{\mathbf{y}}(t)$ является решением этого уравнения на любом промежутке вида $[0; \tilde{t}]$, где $\tilde{t} < T^*$ и при этом $\lim_{t \uparrow T^*} \|\tilde{\mathbf{y}}(t)\| = +\infty$. Ясно, что при конечном значении определенной выше точки t_∞ в ней будет возникать именно этот эффект. Если же последовательность неограничена, то $t_\infty = +\infty$ и решение существует на всей полуоси времени. Именно так будет в случае ограниченной во всем пространстве функции \mathbf{g} . Однако и в случае не более чем линейной скорости роста $\|\mathbf{g}\|$ blow-up в конечном моменте времени не возникнет. Это следует из результатов работы [Sidorov, 2014], которые легко адаптировать к рассматриваемому нами случаю. Поэтому можно утверждать, что для линейных систем управления вида ((1), (2)) blow-up не возникает.

Сведение уравнений системы к дифференциальным для одного класса ядер

Система интегро-дифференциальных уравнений ((1), (2)) является достаточно

сложным математическим объектом как в части аналитического исследования ее свойств, так и в части численного решения. Однако для одного класса ядер $\mathbf{K}(\cdot)$ можно исключить из этой системы интегральный член, увеличив размерность фазового пространства. Система при этом сводится к системе только дифференциальных уравнений с заданными начальными условиями на дополнительные фазовые переменные. Опишем этот класс ядер и процедуру исключения интегрального члена.

Пусть ядро $\mathbf{K}(s)$ является решением следующего линейного однородного дифференциального уравнения с постоянными скалярными коэффициентами a_l , $l = 0, \dots, p$:

$$a_0 \frac{d^p \mathbf{K}}{ds^p} + a_1 \frac{d^{p-1} \mathbf{K}}{ds^{p-1}} + \dots + a_{p-1} \frac{d \mathbf{K}}{ds} + a_p \mathbf{K} = \mathbf{0}. \quad (20)$$

Отметим, что если каждая компонента $K_{ij}(s)$ матричного ядра удовлетворяет уравнению вида (20) со своим порядком p_{ij} и со своими наборами коэффициентов a_{ij} , $l = 0, \dots, p_{ij}$, то и матричное ядро удовлетворяет уравнению такого же типа, причем порядок этого уравнения не превосходит суммы порядков уравнений для компонент. Поэтому рассматриваемый случай охватывает весьма широкий класс ядер с экспоненциальной асимптотикой затухания.

Продифференцируем управление последовательно несколько раз по времени, используя правило дифференцирования интеграла, зависящего от параметров, и предполагая дифференцируемость функции \mathbf{q} по всем переменным необходимое число раз:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{u}}{dt} &= \int_0^t \mathbf{K}^{(1)}(t-\tau)\mathbf{q}(\mathbf{x}(\tau),\tau) d\tau + \\ &+ \mathbf{K}(0)\mathbf{q}(\mathbf{x}(t),t), \\ \frac{d^2\mathbf{u}}{dt^2} &= \int_0^t \mathbf{K}^{(2)}(t-\tau)\mathbf{q}(\mathbf{x}(\tau),\tau) d\tau + \\ &+ \mathbf{K}^{(1)}(0)\mathbf{q}(\mathbf{x}(t),t) + \mathbf{K}(0)\frac{d}{dt}\mathbf{q}(\mathbf{x}(t),t), \\ \frac{d^3\mathbf{u}}{dt^3} &= \int_0^t \mathbf{K}^{(3)}(t-\tau)\mathbf{q}(\mathbf{x}(\tau),\tau) d\tau + \\ &+ \mathbf{K}^{(2)}(0)\mathbf{q}(\mathbf{x}(t),t) + \mathbf{K}^{(1)}(0)\frac{d}{dt}\mathbf{q}(\mathbf{x}(t),t) + \\ &+ \mathbf{K}(0)\frac{d^2}{dt^2}\mathbf{q}(\mathbf{x}(t),t). \end{aligned} \tag{21}$$

Из полученных равенств хорошо видно общее выражение для производных управления:

$$\begin{aligned} \frac{d^l\mathbf{u}}{dt^l} &= \int_0^t \mathbf{K}^{(l)}(t-\tau)\mathbf{q}(\mathbf{x}(\tau),\tau) d\tau + \\ &+ \sum_{i=0}^{l-1} \mathbf{K}^{(i)}(0)\frac{d^{l-i}}{dt^{l-i}}\mathbf{q}(\mathbf{x}(t),t), \\ l &= 0, \dots, p. \end{aligned} \tag{22}$$

Из этих формул сразу легко получить начальные условия для управления и его производных

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^{(l)}(0) &= \sum_{i=0}^{l-1} \mathbf{K}^{(i)}(0)\frac{d^{l-i}}{dt^{l-i}}\mathbf{q}(\mathbf{x}(t),t) \Big|_{t=0}, \\ l &= 0, \dots, p-1. \end{aligned} \tag{23}$$

которые выражаются в конечном счете через начальные значения фазовых переменных, если функции \mathbf{f} и \mathbf{q} дифференцируемы необходимое число раз.

Домножим каждое из равенств на a_l и просуммируем по $l=0, \dots, p$. Получим следующее уравнение

$$\begin{aligned} \sum_{l=0}^p a_l \frac{d^l\mathbf{u}}{dt^l} &= \int_0^t \mathbf{q}(\mathbf{x}(\tau),\tau) \sum_{l=0}^p a_l \mathbf{K}^{(l)}(t-\tau) d\tau + \\ &+ \sum_{l=0}^p a_l \sum_{i=0}^{l-1} \mathbf{K}^{(i)}(0)\frac{d^{l-i}}{dt^{l-i}}\mathbf{q}(\mathbf{x}(t),t). \end{aligned} \tag{24}$$

Из уравнения ядра видно, что интегральный член равен нулю и уравнение является дифференциальным. Все рассмотренные преобразования являются равносильными, поскольку каждое последовательное дифференцирование управления дополняется соответствующим начальным условием.

Итак, получаем, что интегро-дифференциальные уравнения ((1), (2)) вместе с начальными условиями на фазовые переменные $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}^0$ равносильны следующей задаче Коши, если ядро оператора обратной связи удовлетворяет уравнению (5) и функции \mathbf{f} и \mathbf{q} являются p раз дифференцируемыми:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{x}}{dt} &= \mathbf{f}(\mathbf{x},\mathbf{u},t), \\ a_0 \frac{d^p\mathbf{u}}{dt^p} + a_1 \frac{d^{p-1}\mathbf{u}}{dt^{p-1}} + \dots + a_p \mathbf{u} &= \\ &= \sum_{l=0}^p a_l \sum_{i=0}^{l-1} \mathbf{K}^{(i)}(0)\frac{d^{l-i}}{dt^{l-i}}\mathbf{q}(\mathbf{x}(t),t), \\ \mathbf{x}(0) &= \mathbf{x}^0, \\ \mathbf{u}^{(l)}(0) &= \sum_{i=0}^{l-1} \mathbf{K}^{(i)}(0)\frac{d^{l-i}}{dt^{l-i}}\mathbf{q}(\mathbf{x}(t),t) \Big|_{t=0}, \\ l &= 0, \dots, p-1. \end{aligned} \tag{25}$$

Пример исключения интегрального члена

Рассмотрим один частный случай ядер, удовлетворяющих уравнению (20), для иллюстрации построений предыдущего пункта. Пусть управление в системе ((1), (2)) является скалярным, т. е. $r = 1$, и функция обратной связи тоже скалярная, т. е. $m = 1$. Тогда и ядро обратной связи будет скалярной функцией. Пусть это ядро имеет вид

$$K(s) = s^{p-1} \exp(-s), \quad s = 1, 2, 3, \dots \quad (26)$$

Все ядра такого типа соответствуют экспоненциальному затуханию памяти, но есть принципиальная разница между случаями $p = 1$ и $p > 1$. А именно, при $p = 1$ управление мгновенно откликается на изменение актуального состояния, т. к. $K(0) \neq 0$ и в интеграле в выражении для управления (2) более всего значимы состояния в текущий момент времени t , поскольку ядро быстро убывает. Если же $p > 1$, то $K(0) = 0$, его значения около нуля малы, а максимум достигается в точке $(p-1)$, т. е. наибольший вклад в управление дают состояния в моменты времени, отстоящие от текущего на $(p-1)$ единицу. Поэтому можно сказать, что p определяет задержку в обратной связи.

Ясно, что ядро (26) удовлетворяет уравнению типа (20), а именно

$$\left(\frac{d}{ds} + 1\right)^p K(s) = \sum_{l=0}^p C_p^l \frac{d^{p-l} K}{ds^{p-l}} = 0, \quad (27)$$

где C_p^l – биномиальные коэффициенты, причем

$$K^{(p-1)}(0) = (p-1)! \text{ и } K^{(l)}(0) = 0, \quad \text{при } l = 0, \dots, p-2. \quad (28)$$

Формулы (25) для рассматриваемого случая примут вид

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}, u, t), \\ \left(\frac{d}{dt} + 1\right)^p \mathbf{u}(t) &= (p-1)! \cdot q(\mathbf{x}(t), t), \\ \mathbf{x}(0) &= \mathbf{x}^0, \\ \mathbf{u}^{(l)}(0) &= 0, \quad l = 0, \dots, p-1. \end{aligned} \quad (29)$$

Дифференциальные уравнения в (29) соответствуют $(n+p)$ -мерному пространству состояний-управлений. Однако если начальные условия \mathbf{x}^0 на состояния можно выбирать достаточно произвольно, то условия на управление и его производные жестко заданы. Поэтому они выделяют в $(n+p)$ -мерном пространстве подмногообразии, которое и является многообразием состояний-управлений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено исследование одного класса систем управления абстрактным объектом с эредитарной обратной связью. Полученные результаты показывают, что можно гарантированно утверждать существование и единственность решения уравнений системы на конечном интервале времени, а в случае линейной системы – и на всей полуоси времени. В нелинейном случае для быстрорастущих функций в уравнениях состояния и обратной связи возможно разрушение решения за конечное время (blow-up).

Показано, что для одного класса ядер с экспоненциальной асимптотикой возможно сведение системы к дифференциальной, что свидетельствует о том, что эредитарность является свойством не самой реальной системы, а ее модельного представления с недостаточным числом степеней свободы.

ЛИТЕРАТУРА

Апарцин А.С. 1999. Неклассические уравнения Вольтерра первого рода: теория и численные методы. Новосибирск: Наука. 193 с.
 Водинчар Г.М., Казаков Е.А. 2023. Исключение интегрального члена в уравнениях одной эредитарной системы,

- связанной с задачей гидромагнитного динамо. *Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки*. Т. 42. № 1. С. 180–190.
- Вольтерра В. 1976. Математическая теория борьбы за существование. Москва: Наука. 286 с.
- Вольтерра В. 1982. Теория функционалов, интегральных и интегро-дифференциальных уравнений. Москва: Наука. 304 с.
- Казаков Е.А. 2022. Двухмодовая модель гидромагнитного динамо с памятью. *Вычислительные технологии*. Т. 27. № 6. С. 19–32.
- Ким Д.П. 2004. Теория автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. Москва: Физматлит. 464 с.
- Паровик Р.И. 2020. Анализ добротности вынужденных колебаний дробного линейного осциллятора. *Журнал технической физики*. Т. 90. № 7. С. 1059–1063.
- Сидоров Д.Н. 2011. Методы анализа интегральных динамических систем: теория и приложения. Иркутск: Изд-во ИрГУ. 293 с.
- Учайкин В.В. 2008. Метод дробных производных. Ульяновск: Артишок. 512 с.
- Яценко Ю.П. 1991. Интегральные модели систем с управляемой памятью. Киев: Наукова думка. 220 с.
- Ali H.M., Pereira F.L., Gama S.M.A. 2016. A new approach to the Pontryagin maximum principle for nonlinear fractional optimal control problems. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*. Vol. 39. P. 3640–3649.
- Maleknejad K., Ebrahimzadeh A. 2014. Optimal control of volterra integro-differential systems based on legendre wavelets and collocation method. *International Journal of Mathematical and Computational Sciences*. Vol. 91. P. 1040–1044.
- Parovik R. 2020. Mathematical modeling of linear fractional oscillators. *Mathematics*. Vol. 8. № 11. P. 1–26.
- Sidorov D.N. 2011. Volterra equations of the first kind with discontinuous kernels in the theory of evolving systems control. *Studia Informatica Universalis*. № 3. P. 135–146.
- Sidorov D.N. 2014. Existence and blow-up of Kantorovich principal continuous solutions of nonlinear integral equations. *Differential Equations*. Vol. 50. № 9. P. 1217–1224.
- Sweilam N.H., Al-Mekhlafi S.M. 2016. On the optimal control for fractional multi-strain TB model. *Optimal Control Applications and Methods*. Vol. 37. P. 1355–1374.
- Vodinchar G. 2020. Hereditary oscillator associated with the model of large-scale $\alpha\omega$ -dynamo model. *Mathematics*. Vol. 8. № 11. P. 1–16.
- Yang H., Si X., Ivanov I.G. 2024. Constrained state regulation problem of descriptor fractional-order linear continuous-time systems. *Fractal & Fractional*. Vol. 8. P. 255.

REFERENCES

- Apartsin A.S. 1999. Non-classical Volterra equations of the first kind: theory and numerical methods. Novosibirsk: Nauka Publ. 193 p. (in Russian).
- Vodinchar G.M., Kazakov E.A. 2023. Elimination of the integral term in the equations of one hereditary system associated with the problem of a hydromagnetic dynamo. *Vestnik KRAUNTS. Fiziko-matematicheskie nauki (Bulletin of KRAUNC. Physical and Mathematics Sciences)*. Vol. 42. № 1. P. 180–190 (in Russian).
- Volterra V. 1976. Mathematical theory of the struggle for Existence. Moscow: Nauka Publ. 286 p. (in Russian).

- Volterra V. 1982. Theory of functionals, integral and integro-differential equations. Moscow: Nauka Publ. 304 p. (in Russian).
- Kazakov E.A. 2022. Dual-mode model of hydromagnetic dynamo with memory. *Vychislitel'nyye tekhnologii (Computational Technologies)*. Vol. 27. № 6. P. 19–32 (in Russian).
- Kim D.P. 2004. Automatic control theory. Multidimensional, nonlinear, optimal and adaptive systems. Moscow: Fizmatlit Publ. 464 p. (in Russian).
- Parovik R.I. 2020. Analysis of the quality factor of forced oscillations of a fractional linear oscillator. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki (Journal of Technical Physics)*. Vol. 90. № 7. P. 1059–1063 (in Russian).
- Sidorov D.N. 2011. Methods of analysis of integral dynamic systems: theory and applications. Irkutsk: IrSU Publ. 293 c. (in Russian).
- Uchaikin V.V. 2008. Method of fractional derivatives. Ulyanovsk: Artichoke Publ. 512 p. (in Russian).
- Yatsenko Yu.P. Integral models of systems with controlled memory. 1991. Kiev: Naukova Dumka Publ. 220 p. (in Russian).
- Ali H.M., Pereira F.L., Gama S.M. A. 2016. A new approach to the Pontryagin maximum principle for nonlinear fractional optimal control problems. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*. Vol. 39. P. 3640–3649.
- Maleknejad K., Ebrahimzadeh A. 2014. Optimal control of volterra integro-differential systems based on legendre wavelets and collocation method. *International Journal of Mathematical and Computational Sciences*. Vol. 91. P. 1040–1044.
- Parovik R. 2020. Mathematical modeling of linear fractional oscillators. *Mathematics*. Vol. 8. № 11. P. 1–26.
- Sidorov D.N. 2011. Volterra equations of the first kind with discontinuous kernels in the theory of evolving systems control. *Studia Informatica Universalis*. № 3. P. 135–146.
- Sidorov D.N. 2014. Existence and blow-up of Kantorovich principal continuous solutions of nonlinear integral equations. *Differential Equations*. Vol. 50. № 9. P. 1217–1224.
- Sweilam N.H., Al-Mekhlafi S.M. 2016. On the optimal control for fractional multi-strain TB model. *Optimal Control Applications and Methods*. Vol. 37. P. 1355–1374.
- Vodinchar G. 2020. Hereditary oscillator associated with the model of large-scale $\alpha\omega$ -dynamo model. *Mathematics*. Vol. 8. № 11. P. 1–16.
- Yang H., Si X., Ivanov I.G. 2024. Constrained state regulation problem of descriptor fractional-order linear continuous-time systems. *Fractal & Fractional*. Vol. 8. P. 255.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Водинчар Глеб Михайлович – Камчатский государственный технический университет; 683003, Россия, Петропавловск-Камчатский; кандидат физико-математических наук, доцент; доцент кафедры «Системы управления»; gvodinchar@yandex.ru. SPIN-код: 2079-6494, Author ID: 289489; Scopus ID: 56514066300.

Vodinchar Gleb Mikhailovich – Kamchatka State Technical University; 683003, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Candidate of Physical and Mathematical Sciences; Associate Professor of Control Systems Chair; gvodinchar@yandex.ru. SPIN-code: 2079-6494, Author ID: 289489; Scopus ID: 56514066300.

Казаков Евгений Анатольевич – Камчатский государственный технический университет; 683003, Россия, Петропавловск-Камчатский; старший преподаватель кафедры «Системы управления»; mifistjohn@gmail.com. SPIN-код: 3564-6783, Author ID: 954423; Scopus ID: 57204824921.

Kazakov Evgeny Anatolyevich – Kamchatka State Technical University; 683003, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Senior Lecturer of Control Systems Chair; mifistjohn@gmail.com. SPIN-code: 3564-6783, Author ID: 954423; Scopus ID: 57204824921.

Статья поступила в редакцию 15.11.2024; одобрена после рецензирования 27.01.2025; статья принята к публикации 20.03.2025.

The article was submitted 15.11.2024; approved after reviewing 27.01.2025; accepted for publication 20.03.2025.

Для цитирования: Водинчар Г.М., Казаков Е.А. 2025. Об одной абстрактной системе управления с памятью в обратной связи. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. Вып. 71. С. 21–32. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2025-71-21-32>.

For citation: Vodinchar G.M., Kazakov E.A. 2025. On one abstract control system with memory in feedback. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta (Bulletin of Kamchatka State Technical University)*. Iss. 71. P. 21-32 (in Russian). <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2025-71-21-32>.

Научная статья

УДК 664.955.2

DOI: 10.17217/2079-0333-2025-71-33-45

**ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА
КАК СТАБИЛИЗАТОРА КАЧЕСТВА ЗЕРНА
СОЛЕНОЙ ЗАМОРОЖЕННОЙ ЛОСОСЕВОЙ ИКРЫ**

Румянцев А.Е., Ефимова М.В., Ефимов А.А.

Камчатский государственный технический университет, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35.

В статье представлены результаты исследования влияния обработки газообразным диоксидом углерода лосося зернистой замороженной икры в процессе ее приготовления на прочность икорного зерна и на динамику изменения физико-химических показателей продукции при ее хранении в течение четырех месяцев. Сделан вывод о том, что обработка диоксидом углерода способствовала повышению прочности икорной оболочки, и, как следствие, после размораживания снижалась степень проявления таких дефектов продукции, как лопанец и, соответственно, отстой. Обоснована перспективность сочетания применения в качестве сырья замороженных ястыков икры и приготовления замороженной зернистой икры с высокой степенью сохранения целостности икринок за счет повышения прочности икорной оболочки путем обработки икры газообразным CO_2 . Показано, что обработка икры углекислым газом перед фасованием и в процессе фасования в банки способствовала повышению прочности икорного зерна в среднем на 22–26 г по сравнению с прочностью икринок образцов, приготовленных без применения CO_2 , а также не приводила к интенсификации процессов протеолитической и окислительной порчи продукции.

Ключевые слова: диоксид углерода, лопанец, лосося зернистая икра, прочность икорной оболочки.

Original article

**JUSTIFICATION OF THE CARBON DIOXIDE GAS USE AS A STABILIZER
OF GRAIN QUALITY OF SALTED FROZEN SALMON CAVIAR**

Rumyantsev A.E., Efimova M.V., Efimov A.A.

Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Klyuchevskaya Str. 35.

The results of a study of the effect of carbon dioxide treatment of salmon granular frozen caviar during its preparation on the strength of caviar grains and on the dynamics of changes in the physico-chemical parameters of products during storage for four months are presented. It was concluded that carbon dioxide treatment contributed to an increase in the strength of the caviar shell, and, as a result, after defrosting, the degree of product defects such as bursteggs and, consequently, sludge decreased. The prospects of combining the use of frozen caviar as a raw material and the preparation of frozen granular caviar with a high degree of preservation of the integrity of the eggs by increasing the strength of the caviar shell by treating caviar with CO_2 gas are substantiated. It was shown that the treatment of caviar with carbon dioxide before packing and during packing in cans increased the strength of caviar grains by an average of 22–26 g

compared with the strength of eggs of samples prepared without the use of CO₂, and also did not lead to an intensification of the processes of proteolytic and oxidative spoilage of products.

Key words: carbon dioxide, bursteggs, salmon granular caviar, strength of the caviar shell.

ВВЕДЕНИЕ

Особенности биохимического состава рыбы и морепродуктов обуславливают их высокую лабильность к воздействию различных факторов как при технологической обработке, так и при хранении. В связи с этим применение на практике того или иного способа консервирования, способствующего повышению степени сохраняемости качества готовой продукции, имеет важное значение.

О консервирующих свойствах двуокиси углерода известно с конца XIX в., однако только в 1930 г. Киллефер показал, что в присутствии CO₂ рыбу можно хранить в течение более длительных периодов без потери ее качества [Stansby, Griffiths, 1935]. В России значительный вклад в исследование консервирующих свойств углекислоты был внесен в 1934 г. П.А. Алексеевым. Результаты проведенных им экспериментов подтвердили способность углекислого газа продлевать продолжительность периода, в течение которого можно сохранять рыбу. Позднее исследования многих авторов показали, что при хранении скоропортящихся продуктов в среде CO₂ можно достичь значительного увеличения сроков годности [Макашев, 1959б], в том числе благодаря способности углекислого газа даже в концентрациях менее 10% снижать интенсивность окислительных процессов в липидах [Макашев, 1959а]. Эффективность применения CO₂ также была подтверждена экспериментально, в ходе которых сроки хранения свежего лосося при температуре (2 ± 1)°C удалось увеличить в два раза по сравнению

с контрольными образцами, хранившимися при такой же температуре в воздушной среде, при этом показатели pH тканевой влаги и микробиологические показатели экспериментальных образцов лосося оказались ниже, чем у контрольных образцов рыбы [Pastoriza et al., 1996]. Полученные данные показывают перспективность применения диоксида углерода для продления сроков годности и сохранения качества продукции как доступного, экологически нейтрального агента.

Решая задачу использования в пищевых технологиях диоксида углерода как консервирующего фактора, необходимо учитывать такие важные свойства CO₂, как способность замедлять скорость протекания процессов окисления липидов [Макашев, 1959а], влияние на активность протеолитических ферментов [Макашев, 1959б], воздействие на микрофлору [Pastoriza et al., 1996], возможность вызывать изменение органолептических показателей качества продукции, а также учитывать техническую сторону применения углекислоты [Румянцев и др., 2024].

При традиционных условиях приготовления и хранения зернистой лососевой икры в продукте, как правило, наблюдаются нежелательные изменения, усиливающиеся с течением времени. Консистенция икры ослабевает за счет потери оболочки икринок прочности и эластичности, в результате выделяется желточная масса – густая клейкая жидкость, отстой, скапливающийся на дне тары. При наличии значительного количества лопанца уровень жидкости может достигать едва не верхних слоев икры в емкости.

В течение довольно длительного периода времени на рыбоперерабатывающих предприятиях практикуется замораживание ястычной икры лососевых рыб [ТУ 10.20.26-015-37676459-2019, 2019] как способа, позволяющего быстро консервировать большие партии икры в период лососевой путины. Однако при производстве из такого сырья после его размораживания соленой зернистой икры высока доля отходов и потерь, много лопанца. В то же время при замораживании соленой икры, выработанной из свежих ястыков, подобная проблема решается тем, что в процессе просаливания за счет повышенного осмотического давления снижается массовая доля влаги в желточной массе, а это, в свою очередь, способствует повышению вязкости последней. Более того, выбрав правильный режим размораживания, можно добиться высокой степени обратимости и сохранить те свойства зернистой икры, которыми она обладала до замораживания. В связи с особенностями развития технологии переработки икры лососевых рыб, косвенно связанными с введением в действие в 2008 г. дополнений и изменений к СанПиН 2.3.2.1293-03, исключивших применение уротропина как антисептика, активно ведется поиск решений, направленных на повышение хранимоспособности икры без применения химических консервантов.

Применяемые в настоящее время новые, а также традиционные технологии изготовления лососевой зернистой икры не предусматривают применение двуоксида углерода [Инструкция..., 2003; ГОСТ 31793-2012, 2019; ГОСТ 31794-2012, 2019], что косвенно говорит об отсутствии изысканий в этом направлении. Данные, полученные нами в результате проведенных ранее исследований, показали, что применение диоксида углерода в техноло-

гии лососевой зернистой икры наряду с увеличением срока годности без применения антисептиков может способствовать повышению прочности икорной оболочки [Румянцев и др., 2024], а это является одним из направлений решения такой важной задачи икорного производства, как снижение степени проявления дефектов лопанца и отстоя.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Целью работы на данном этапе являлось обоснование применения газообразного диоксида углерода в технологии зернистой замороженной лососевой икры, приготовленной из мороженых ястыков, для чего исследовали характер влияния обработки икры углекислым газом на прочность зерна и физико-химические показатели готовой продукции.

В качестве объекта исследования рассматривали технологию приготовления икры лососевой зернистой замороженной с применением ее обработки углекислым газом [Румянцев и др., 2024].

Сырьем для приготовления контрольных и экспериментальных образцов зернистой икры являлась икра кижуча ястычная мороженая [ТУ 10.20.26-015-37676459-2019, 2019].

Для определения характера воздействия углекислого газа на оболочку икринки были приготовлены две группы образцов зернистой икры с массовой долей хлорида натрия 4,0%.

Основные технологические операции при изготовлении контрольных группы К и экспериментальных группы Г образцов икры производили согласно утвержденной инструкции [Инструкция..., 2003]. Предварительно размороженные в течение 12 часов при температуре 4°C ястыки закрепляли в течение 5 минут при температуре минус

1°C в солевом растворе плотностью 1,12 кг/дм³. Затем после стекания влаги в течение 15 минут и пробивки на лабораторной грохотке с размером ячеек 10 × 10 мм икру солили в искусственном тузлуке температурой минус 0,9°C плотностью 1,20 кг/дм³ в соотношении 1 : 3 в течение 30 секунд. После посола икру подвергали стеканию в течение 2 часов при температуре не выше 4°C. Затем методом [ГОСТ 7636–85, 2010], основанным на взаимодействии хлорида натрия с нитратом серебра в присутствии индикатора хромата калия с образованием бурого осадка хромата серебра, определяли массовую долю соли в икре.

Фасование контрольных образцов икры группы К по 40 г осуществляли сразу после изготовления в полимерные банки емкостью 30 см³ (рис. 1), после чего образцы замораживали при температуре минус 40°C до достижения температуры в толще продукта минус 18°C.



Рис. 1. Контрольные образцы зернистой икры кижуча, подготовленные к замораживанию

Fig. 1. Control samples of grainular coho caviar prepared for freezing

Для приготовления экспериментальных образцов группы Г икру кижуча обрабатывали газообразным диоксидом углерода в течение 5 минут в специально сконструированной лабораторной установке [Румянцев и др., 2024] (рис. 2) перед фасованием в предварительно обработанные

углекислым газом полимерные банки емкостью 30 см³ по 40 г.

По завершении обработки углекислым газом икру и банки оставляли в рабочей емкости лабораторной установки. Так как газообразный диоксид углерода тяжелее воздуха, он заполнял рабочую емкость установки, что позволило исключить воздействие кислорода, тем самым снижая интенсивность процесса окисления липидов икры. Конструкция установки также позволяет осуществлять фасование обработанной икры, не перемещая ее за пределы рабочей емкости (рис. 3).

Расфасованную в полимерные банки икру замораживали при температуре минус 40°C до достижения в толще продукта температуры минус 18°C и хранили при достигнутой температуре в течение четырех месяцев.

Прочность икорного зерна измеряли с помощью устройства Валента и параллельно с помощью структурометра СТ-1М. Метод определения прочности – статической силы разрушения – основан на измерении массы груза, под действием которого икринки начинают лопаться. В качестве насадки в устройстве Валента применяли цилиндр с радиусом основания 12 мм. Пробу образца икры помещали на специально изготовленную круглую площадку радиусом 13 мм со стенкой, усовершенствованную нами во избежание выскальзывания икринок, и устанавливали под насадку, после чего шток нагружали до момента, когда икринки начинали лопаться. Определение прочности зерна на структурометре СТ-1М основано на получении значения величины усилия нагружения индентора полусферической формы площадью $2 \times 10^{-4} \text{ м}^2$, вызывающего прорыв икринки при скорости ее нагружения 12 г/с и при начальном усилии 100 г касания индентором поверхности икринки.



Рис. 2. Обработка образцов зернистой икры кижуча и полимерных банок газообразным диоксидом углерода в лабораторной установке: 1 – загрузка икры и банок в рабочую емкость установки; 2 – выдерживание икры и банок в установке при подаче газообразного диоксида углерода

Fig. 2. Processing of samples of granular coho caviar and polymer cans with carbon dioxide gas in a laboratory installation: 1 – loading caviar and cans into the working tank of the installation; 2 – keeping caviar and cans in the installation when carbon dioxide gas is supplied



Рис. 3. Фасование образцов зернистой икры кижуча в полимерные банки в рабочей емкости лабораторной установки

Fig. 3. Packing of samples of granular coho caviar into polymer cans in a working container of a laboratory installation

Метод оценки степени проявления дефекта лопанца основан на прямом подсчете пустых оболочек икринок в навеске образца [ГОСТ 7636–85, 2010] (рис. 4).

Для оценки влияния обработки икры газообразным диоксидом углерода на физико-химические показатели продукта в процессе хранения исследовали динамику протеолитических и окислительных процессов – определяли, соответственно, содержание азота летучих оснований (АЛО) и значение перекисного числа жира образцов икры. Содержание АЛО определяли отгонкой свободных и связан-

ных летучих азотистых оснований с паром при взаимодействии образующегося аммиака с серной кислотой, оттитровыванием избытка кислоты щелочью и выражением полученного результата в единицах измерения «мг%» [О безопасности..., 2016]. Перекисное число жира икры определяли на основе реакции взаимодействия перекисей и гидроперекисей с йодидом калия в растворе уксусной кислоты и хлороформа и последующем оттитровывании выделившегося йода раствором серноватистокислого натрия [ГОСТ 7636–85, 2010].



Рис. 4. Определение лопанца в образцах зернистой икры кижуча: 1 – пробы икры в чашке Петри; 2 – промывание проб икры водой; 3 – отделение пустых оболочек икринок (лопанца)

Fig. 4. Determination of burst eggs in samples of granular coho caviar: 1 – caviar samples in a Petri dish; 2 – washing of caviar samples with water; 3 – separation of empty egg shells (burst eggs)

Статистическую обработку полученных экспериментальных данных осуществляли подсчетом средних значений величин и стандартной средней ошибки, а также графоаналитически. Систематизацию и обобщение данных производили с помощью программы операционной системы Astra Linux. Численные значения, приведенные в таблицах, представляют собой арифметическое среднее с доверительным интервалом $\Delta \pm 10\%$ и доверительной вероятностью $P = 0,95$ для обеспечения надежности результатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки степени положительного воздействия газообразного диоксида углерода на прочность икорного зерна проводили определение величины статической силы разрушения икринок образцов солевой замороженной икры кижуча, приготовленной из икры ястычной мороженой.

Ранее проведенные исследования, в процессе которых икру обрабатывали углекислым газом на стадии закрепления ястыков в течение 5 минут при атмосферном давлении и при температуре помещения 24°C, показали, что применение такого способа приводило к незначительному снижению выхода – на 1,2% – пробитого зерна по сравнению с образцами контрольной груп-

пы *K*. Содержание соли в такой икре было несколько выше солености образцов группы *K* при одинаковой продолжительности посола – 7,8 и 7,4% соответственно, из чего было заключено, что обработка газообразным CO_2 вызывала деградацию оболочки икринки. Прочность зерна образцов группы *K* оказалась выше прочности икринок образцов группы *G*. В то же время органолептические показатели качества образцов икры группы *G* превосходили таковые образцов контрольной группы *K*.

В связи с вышеизложенным на данном этапе обработку икры углекислым газом осуществляли не на стадии закрепления ястыков, а перед фасованием и в процессе фасования в банки уже посоленной икры.

Для проведения испытаний размораживание исследуемых образцов икры кижуча зернистой замороженной осуществляли в камере бытового холодильника при температуре 4°C. Лабораторные исследования проводили при достигнутой температуре.

Определение прочности зерна образцов икры проводили в течение четырех месяцев по схеме – сразу после приготовления замороженного продукта – фон, затем через месяц после закладки на хранение; последующие определения осуществляли через каждый месяц:

$$K_1 \overset{\text{месяц}}{\Gamma}_1 \rightarrow K_2 \overset{\text{месяц}}{\Gamma}_2 \rightarrow K_3 \overset{\text{месяц}}{\Gamma}_3 \rightarrow K_4 \overset{\text{месяц}}{\Gamma}_4 \rightarrow K_5 \overset{\text{месяц}}{\Gamma}_5.$$

При фоновом испытании образца Γ_1 , обработанного газообразным диоксидом углерода перед фасованием и в процессе фасования икры в банки, и контрольного образца K_1 , приготовленного без применения CO_2 , было установлено, что обработка соленой икры газообразным диоксидом углерода и ее фасование в среде углекислого газа перед замораживанием способствовали повышению механической прочности оболочки икринок, что наглядно подтверждалось внешним видом образцов (рис. 5).

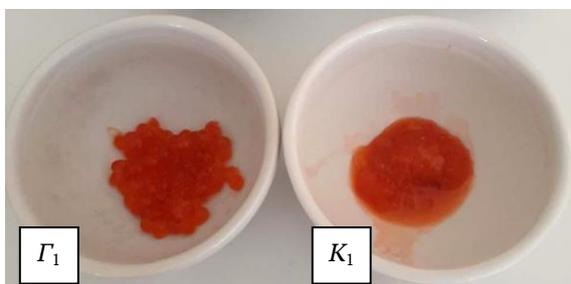


Рис. 5. Внешний вид образцов икры после размораживания: Γ_1 – зернистая икра кижуча, обработанная газообразным диоксидом углерода перед укладкой в банку и расфасованная в среде CO_2 ; K_1 – зернистая икра кижуча, приготовленная без применения диоксида углерода

Fig. 5. Appearance of caviar samples after defrosting: Γ_1 – granular coho caviar, treated with carbon dioxide gas before being placed in a can and packaged in a CO_2 environment; K_1 – granular coho caviar, treated without carbon dioxide

Как видно из рисунка 5, икринки образца Γ_1 , обработанного газообразным диоксидом углерода перед укладкой в банку и расфасованного в среде CO_2 , после размораживания сохраняли целостность, а в икре контрольного образца K_1 образовался лопанец, что привело к появлению отстоя в виде желточной массы икринок.

Результаты определения прочности зерна образцов икры кижуча зернистой замороженной групп K и Γ после размораживания представлены в таблице 1 и на рисунке 6.

Как видно из таблицы 1 и рисунка 6, прочность зерна образцов икры группы Γ оказалась значительно выше прочности соответствующих образцов икры группы K , в среднем на 22–26 г, или на 0,22–0,25 Н. Результаты, полученные для икры группы K , не подвергавшейся воздействию углекислого газа, согласуются с данными В.Н. Дегтярева, определившего величину статической силы разрушения для соленого зерна икры горбуши 0,5 Н [Дегтярев, 2002], или 50,9 г. Тенденции к снижению либо увеличению прочности в течение периода проведения испытаний в пределах каждой группы образцов икры отмечено не было. Прочность зерна образца икры K_1 определить не представилось возможным из-за отсутствия достаточного количества целых икринок в данном образце после размораживания (рис. 5).

С результатами, полученными при определении прочности зерна, коррелируют результаты определения количества лопанца в образцах зернистой икры после размораживания (табл. 2, рис. 7).

Как видно из таблицы 2 и рисунка 7, количество лопанца в образцах икры группы Γ оказалось значительно меньше, чем в соответствующих образцах икры группы K , – в среднем на 49,2–53,8%, что составило очень большую разницу между данными, полученными для икры, обработанной диоксидом углерода, и данными по икре контрольной группы образцов, приготовленных без применения CO_2 . Тенденции к снижению либо увеличению количества лопанца в течение периода проведения испытаний в пределах каждой группы образцов икры отмечено не было.

Для оценки влияния обработки икры газообразным диоксидом углерода на физико-химические показатели продукта исследовали динамику протеолитических и окислительных процессов при хранении образцов в течение четырех месяцев.

Таблица 1. Зависимость прочности зерна икры кижуча от способа обработки икры при ее изготовлении и продолжительности хранения при температуре минус 18°С

Table 1. The dependence of the strength of coho caviar grains on the method of processing caviar during its manufacture and the duration of storage at a temperature of -18°С

Продолжительность хранения образца икры	Обозначение образца контрольной группы	Прочность зерна		Обозначение образца экспериментальной группы	Прочность зерна	
		г	Н		г	Н
Фон	K_1	-	-	Γ_1	$78,0 \pm 1,4$	$0,76 \pm 0,01$
1 месяц	K_2	$51,7 \pm 1,2$	$0,51 \pm 0,01$	Γ_2	$70,3 \pm 1,4$	$0,69 \pm 0,01$
2 месяца	K_3	$48,3 \pm 1,2$	$0,47 \pm 0,01$	Γ_3	$71,1 \pm 1,5$	$0,70 \pm 0,01$
3 месяца	K_4	$52,0 \pm 1,3$	$0,51 \pm 0,01$	Γ_4	$71,3 \pm 1,4$	$0,69 \pm 0,01$
4 месяца	K_5	$50,0 \pm 1,3$	$0,49 \pm 0,01$	Γ_5	$70,9 \pm 1,4$	$0,69 \pm 0,01$

Примечание. Указаны значения прочности икорного зерна, полученные определением на структурометре СТ-1М

Note. The strength values of caviar grains obtained by determination on the СТ-1М structurometer are indicated

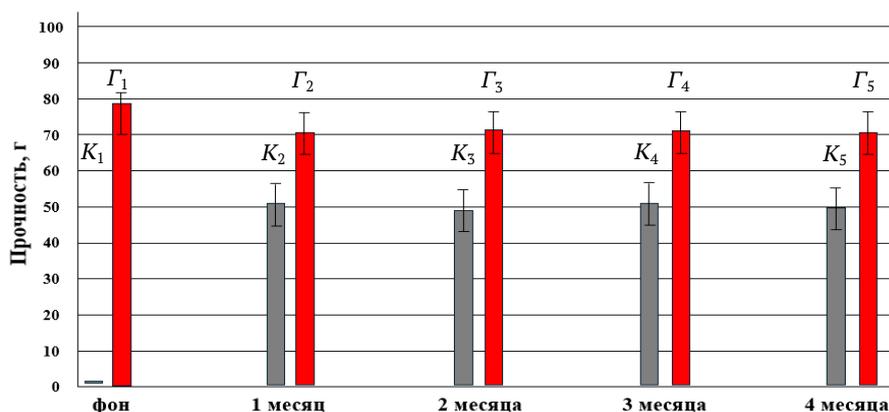


Рис. 6. Зависимость прочности зерна икры кижуча от способа обработки икры при ее изготовлении и продолжительности хранения при температуре минус 18°С (результаты получены определением на структурометре СТ-1М)

Fig. 6. The dependence of the strength of coho caviar grains on the method of processing caviar during its manufacture and the duration of storage at a temperature of -18°С (the results were obtained by means of a СТ-1М structurometer)

Таблица 2. Зависимость количества лопанца в образцах зернистой икры кижуча от способа обработки икры при ее изготовлении и продолжительности хранения при температуре минус 18°С

Table 2. The dependence of the amount of burst eggs in samples of granular coho caviar on the method of processing caviar during its manufacture and the duration of storage at a temperature of -18°С

Продолжительность хранения образца икры	Обозначение образца контрольной группы	Количество лопанца, %	Обозначение образца экспериментальной группы	Количество лопанца, %
Фон	K_1	83,0	Γ_1	3,9
1 месяц	K_2	57,0	Γ_2	4,5
2 месяца	K_3	53,1	Γ_3	4,9
3 месяца	K_4	58,2	Γ_4	5,0
4 месяца	K_5	59,0	Γ_5	5,2

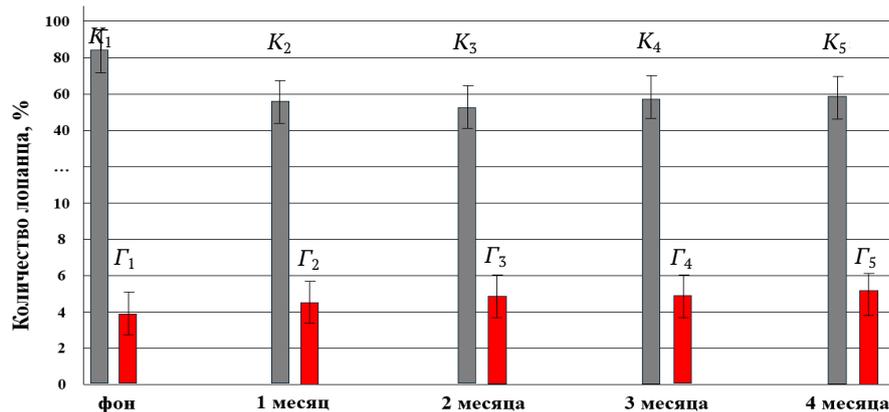


Рис. 7. Зависимость количества лопанца в образцах зернистой икры кижуча от способа обработки икры при ее изготовлении и продолжительности хранения при температуре минус 18°C

Fig. 7. The dependence of the amount of burst eggs in samples of granular coho caviar on the method of processing caviar during its manufacture and the duration of storage at a temperature of -18°C

Продуктами протеолиза являются небелковые азотистые вещества, в том числе летучие основания [Килкаст, Субраманиам, 2012]. Установлено, что для недоброкачественной икры характерно содержание азота летучих оснований свыше $30,0 \text{ мг}\%$ [Кизеветтер и др., 1976]. Продуктами окисления липидов являются некоторые эфиры, а также нежелательные соединения – перекиси и гидроперекиси [Килкаст, Субраманиам, 2012]. Результаты исследования динамики изменения АЛО и перекисного числа жира образцов икры при хранении в течение четырех месяцев приведены в таблице 3.

Как видно из таблицы 3, при хранении образцов зернистой икры кижуча в замороженном состоянии при температуре минус 18°C была отмечена стабильность показателей протеолитических и окислительных изменений. Изменение содержания АЛО в сторону увеличения было весьма незначительно, и значение этого показателя через 4 месяца хранения оказалось в 4,0 и 4,2 раза ниже предельного – $30,0 \text{ мг}\%$ [Кизеветтер и др., 1976] – соответственно для контрольного образца группы K и для экспериментального образца группы G , обработанного диоксидом углерода.

Стоит отметить, что углекислый газ способствует интенсификации процесса распада

белков и замедлению процесса окисления липидов [Макашев, 19596]. Следовательно, необходимо контролировать динамику изменения показателей АЛО и перекисного числа жира образцов икры в течение более продолжительного периода хранения.

Таким образом, на основании данных изменения содержания АЛО и перекисного числа жира в образцах икры групп K и G при хранении при температуре минус 18°C в течение четырех месяцев был сделан вывод о том, что обработка газообразным CO_2 в течение 5 минут и последующее фасование в тару в среде углекислого газа не оказывали значимого влияния на процесс распада белков в готовом продукте, значения показателя окислительных процессов липидов икры на протяжении периода наблюдений оставались стабильными.

По результатам определения изменения прочности зерна образцов икры групп K и G в процессе их хранения при температуре минус 18°C в течение четырех месяцев, а также динамики изменения показателей протеолитической и окислительной порчи продукта был сделан вывод о положительном влиянии применения обработки газообразным диоксидом углерода на качество икры лососевой зернистой замороженной, изготовленной из мороженых ястыков.

Таблица 3. Зависимость физико-химических показателей образцов зернистой икры кижуча от способа обработки икры при ее изготовлении и продолжительности хранения при температуре минус 18°С

Table 3. The dependence of the physico-chemical parameters of coho caviar samples on the method of processing caviar during its manufacture and the duration of storage at a temperature of -18°С

Продолжительность хранения образца икры	Обозначение образца контрольной группы	АЛО, мг%	Обозначение образца экспериментальной группы	АЛО, мг%	Обозначение образца контрольной группы	Перекисное число жира, ммоль (½O)/кг	Обозначение образца экспериментальной группы	Перекисное число жира, ммоль (½O)/кг
Фон	K ₁	7,1 ± 0,1	Г ₁	7,0 ± 0,1	K ₁	0,2 ± 0,1	Г ₁	0,1 ± 0,1
1 месяц	K ₂	7,1 ± 0,1	Г ₂	7,0 ± 0,1	K ₂	0,2 ± 0,1	Г ₂	0,2 ± 0,1
2 месяца	K ₃	7,1 ± 0,1	Г ₃	7,0 ± 0,1	K ₃	0,2 ± 0,1	Г ₃	0,2 ± 0,1
3 месяца	K ₄	7,2 ± 0,1	Г ₄	7,1 ± 0,1	K ₄	0,2 ± 0,1	Г ₄	0,2 ± 0,1
4 месяца	K ₅	7,4 ± 0,1	Г ₅	7,1 ± 0,1	K ₅	0,2 ± 0,1	Г ₅	0,2 ± 0,1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение замороженных ястыков в качестве сырья для производства зернистой икры лососевых рыб сопровождается образованием значительного количества лопанца и, соответственно, более значительными отходами и потерями по сравнению с процессом приготовления зернистой икры из ястыков рыбы-сырца. В то же время актуально применение замораживания как промежуточного способа консервирования для заготовки больших объемов ястычной икры при массовом подходе рыбы в период путины. Также актуально применение замораживания как способа консервирования уже готовой соленой зернистой икры, что позволяет производить продукт с пониженным содержанием хлорида натрия и без антисептиков.

Результаты исследований, приведенные в настоящей статье, отражают возможность сочетания применения в качестве сырья мороженых ястыков икры и приготовления замороженной зернистой икры с высокой степенью сохранения целостности икринок за счет повышения прочности икорного зерна путем обработки газообразным диоксидом углерода.

Данные, полученные в течение четырех месяцев с момента изготовления икры лососевой зернистой замороженной, позволяют судить о положительном влиянии обработки икры газообразным диоксидом углерода как на механическую прочность зерна, так и на физико-химические показатели, отражающие степень протеолитической и окислительной порчи продукта.

Прочность зерна экспериментальных образцов икры, обработанных газообразным диоксидом углерода перед фасованием и в процессе укладки в банки, после размораживания оказалась в среднем на 22–26 г выше по сравнению с прочностью зерна икры контрольной группы, приготовленной без применения CO₂. Это, в свою очередь, обусловило снижение степени проявления дефекта лопанца у экспериментальных образцов икры в среднем на 49,2–53,8%, что, безусловно, способствует повышению привлекательности продукции для потребителей. Значения показателей распада белков и окисления липидов икры на протяжении периода проведения исследований были отмечены как стабильные и не превышающие допустимых пределов.

В то же время важной задачей является обеспечение хранимостпособности продукта

как минимум до выработки зернистой лососевой икры в период путины последующего года. Возможность продления срока годности икры за счет обработки газообразным диоксидом углерода требует проведения дальнейших исследований, с учетом коэффициента резерва 1,15 [МУК 4.2.1847–04, 2004], еще на протяжении десяти месяцев.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 7636–85. 2010. Рыба, морские млекопитающие, морские беспозвоночные и продукты их переработки. Методы анализа. Москва: Стандартинформ. 125 с.
- ГОСТ 31793–2012. 2019. Икра лососевая зернистая замороженная. Технические условия. Москва: Стандартинформ. 8 с.
- ГОСТ 31794–2012. 2019. Икра зернистая лососевых рыб. Технические условия. Москва: Стандартинформ. 8 с.
- Дегтярёв В.Н. 2002. Прочность зерна икры лососевых рыб. *Материалы научно-технической конференции «Рациональное использование морских биоресурсов»*. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ. С. 42–47.
- Инструкция по изготовлению лососевой зернистой икры. 2003. *Сборник технологических инструкций по обработке рыбы*. Москва: КолосС. Т. 2. С. 379–391.
- Кизеветтер И.В., Макарова Т.И., Зайцев В.П. и др. 1976. Технология обработки водного сырья. Москва: Пищевая промышленность. 696 с.
- Килкаст Д., Субраманиам П. 2012. Стабильность и срок годности. Мясо и рыбопродукты. Санкт-Петербург: Профессия. 420 с.
- Макашев А.П. 1959а. Влияние углекислого газа на окисление. *Технология рыбных продуктов: Труды ВНИРО*. Москва: Пищепромиздат. Т. 37. С. 100–104.
- Макашев А.П. 1959б. Применение углекислоты при хранении рыбы. *Технология рыбных продуктов: Труды ВНИРО*. Москва: Пищепромиздат. Т. 37. С. 53–70.
- МУК 4.2.1847–04. 2004. Методы контроля. Биологические и микробиологические факторы. Санитарно-эпидемиологическая оценка обоснования сроков годности и условий хранения пищевых продуктов. Москва: Издательский отдел Федерального центра госсанэпиднадзора. 32 с.
- О безопасности рыбы и рыбной продукции: Технический регламент Евразийского Экономического Союза ТР ЕАЭС 040/2016 (принят Решением Совета Евразийской экономической комиссии от 18 октября 2016 г. № 162). URL: <https://docs.cntd.ru/document/420394425?ysclid=lu5evmkg6e94819568> (дата обращения: 27.01.2025).
- Румянцев А.Е., Ефимова М.В., Ефимов А.А. и др. 2024. Влияние применения диоксида углерода на качество икры лососевой зернистой. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. № 68. С. 8–21.
- ТУ 10.20.26-015-37676459–2019. 2019. Икра ястычная мороженая. URL: <https://agropit.ru/икра-ястычная-мороженая-2/?ysclid=m6014fc0dy746479353> (дата обращения: 17.01.2025).
- Pastoriza L., Sampedro G., Herrera J.R., Cabo M.L. 1996. Effect of dioxide atmosphere on microbial growth and quality of salmon slices. *Journal of the Science of Food Agriculture*. № 72. P. 348–352.
- Stansby M.E., Griffiths F.P. 1935. Carbon dioxide in handling fresh fish. *Industrial & Engineering Chemistry*. Vol. 27. P. 1452–1458.

REFERENCES

GOST 7636–85. 2010. Fish, marine mammals, marine invertebrates and products

- of their processing. Methods of analysis. Moscow: Standartinform Publ. 125 p. (in Russian).
- GOST 31793–2012. 2019. Salmon caviar, grainy, frozen. Technical specifications. Moscow: Standartinform Publ. 8 p. (in Russian).
- GOST 31794–2012. 2019. Granular salmon roe. Technical specifications. Moscow: Standartinform Publ. 8 p. (in Russian).
- Degtyarev V.N. 2002. Grain strength of salmon roe. *Proceedings of the scientific and technical conference* “Rational use of marine biological resources”. Petropavlovsk-Kamchatsky: KamchatGTU Publ. P. 42–47 (in Russian).
- Instructions for making salmon grainy caviar. 2003. Collection of technological instructions for processing fish. Moscow: KolosS Publ. Vol. 2. P. 379–391 (in Russian).
- Kizevetter I.V., Makarova T.I., Zaitsev V.P. et al. 1976. The technology of processing water raw materials. Moscow: Food Industry Publ. 696 p. (in Russian).
- Kilcast D., Subramaniam P. 2012. Stability and shelf life. Meat and fish products. Saint Petersburg: Profession Publ. 420 p. (in Russian).
- Makashev A.P. 1959a. The effect of carbon dioxide on oxidation. *Proceedings of VNIRO* “Technology of fish products”. Moscow: Pishchepromizdat Publ. Vol. 37. P. 100–104 (in Russian).
- Makashev A.P. 1959b. The use of carbon dioxide in fish storage. *Proceedings of VNIRO* “Technology of fish products”. Moscow: Pishchepromizdat Publ. Vol. 37. P. 53–70 (in Russian).
- MUK 4.2.1847–04. 2004. Control methods. Biological and microbiological factors. Sanitary and epidemiological assessment of the rationale for expiration dates and storage conditions of food products. Moscow: Publishing Department of the Federal Center for State Sanitary and Epidemiological Supervision. 32 p. (in Russian).
- On the safety of fish and fish products: Technical Regulation of the Eurasian Economic Union TR EAEU 040/2016 (adopted by the Decision of the Council of the Eurasian Economic Commission dated October 18, 2016 №. 162). URL: <https://docs.cntd.ru/document/420394425?ysclid=lu5evmkg6e94819568> (accessed: 27.01.2025) (in Russian).
- Rumyantsev A.E., Efimova M.V., Efimov A.A. et al. 2024. The effect of the use of carbon dioxide on the quality of salmon caviar. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta (Bulletin of Kamchatka State Technical University)*. № 68. P. 8–21 (in Russian).
- TU 10.20.26-015-37676459–2019. 2019. Frozen yastychnaya caviar. URL: <https://agropit.ru/укра-ястычная-мороженая-2/?ysclid=m6014fc0dy746479353> (accessed: 17.01.2025) (in Russian).
- Pastoriza L., Sampedro G., Herrera J.R., Cabo M.L. 1996. Effect of dioxide atmosphere on microbial growth and quality of salmon slices. *Journal of the Science of Food Agriculture*. Vol. 72. P. 348–352.
- Stansby M.E., Griffiths F.P. 1935. Carbon dioxide in handling fresh fish. *Industrial & Engineering Chemistry*. Vol. 27. P. 1452–1458.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Румянцев Антон Евгеньевич – Камчатский государственный технический университет; 683003, Россия, Петропавловск-Камчатский; аспирант; rumtoha@gmail.com. Author ID: 1270597.

Rumyantsev Anton Evgenievich – Kamchatka State Technical University; 683003, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Postgraduate; rumtoha@gmail.com. Author ID: 1270597.

Ефимова Марина Васильевна – Камчатский государственный технический университет; 683003, Россия, Петропавловск-Камчатский; кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры «Технологии пищевых производств»; efimova-ff@mail.ru. SPIN-код: 2046-5520, Author ID: 664258.

Efimova Marina Vasilyevna – Kamchatka State Technical University; 683003, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Candidate of Biological Sciences, Docent, Associate Professor the Food Production Technologies Chair; efimova-ff@mail.ru. SPIN-code: 2046-5520, Author ID: 664258.

Ефимов Андрей Анатольевич – Камчатский государственный технический университет; 683003, Россия, Петропавловск-Камчатский; кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технологии пищевых производств»; efimoff-a@mail.ru. SPIN-код: 2535-4051, Author ID: 645444.

Efimov Andrey Anatolyevich – Kamchatka State Technical University; 683003, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor the Food Production Technologies Chair; efimoff-a@mail.ru. SPIN-code: 2535-4051, Author ID: 645444.

Статья поступила в редакцию 20.01.2025; одобрена после рецензирования 27.02.2025; статья принята к публикации 20.03.2025.

The article was submitted 20.01.2025; approved after reviewing 27.02.2025; accepted for publication 20.03.2025.

Для цитирования: Румянцев А.Е., Ефимова М.В., Ефимов А.А. 2025. Обоснование применения газообразного диоксида углерода как стабилизатора качества зерна соленой замороженной лососевой икры. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. Вып. 71. С. 33–45. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2025-71-33-45>.

For citation: Rumyantsev A.E., Efimova M.V., Efimov A.A. 2025. Justification of the carbon dioxide gas use as a stabilizer of grain quality of salted frozen salmon caviar. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta (Bulletin of Kamchatka State Technical University)*. Iss. 71. P. 33–45. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2025-71-33-45>.

Научная статья

УДК 664.9.047

DOI: 10.17217/2079-0333-2025-71-46-60

АНАЛИЗ СПОСОБОВ СУШКИ СПИРУЛИНЫ И ИКРЫ РЫБ

Ермолаев В.А.

Кузбасский государственный аграрный университет им. В.Н. Полецкова, г. Кемерово, ул. Марковцева, 5.

Спирулина и икра рыб являются термолабильными продуктами, которые требуют щадящих режимов сушки. Рассмотрены различные способы сушки спирулины и икры рыб, которые применялись другими авторами. Описаны полезные свойства спирулины и икры рыб. Предложена технология их сублимационной сушки. Сублимационная сушка позволяет получить сухой продукт с высокими качественными показателями и сохранением всех питательных веществ, которые были в продукте до сушки. Были проведены эксперименты по сублимационной сушке спирулины и икры рыб. В качестве варьируемых факторов выступали толщина слоя и температура досушивания.

Ключевые слова: икра рыб, спирулина, сублимационная сушка, температура сушки, толщина слоя.

Original article

ANALYSIS OF *SPIRULINA* AND FISH ROE DRYING METHODS

Ermolaev V.A.

Kuzbass State Agrarian University named after V.N. Poletskov, Kemerovo, Markovtsev Str. 5.

Spirulina and fish roe are heat-labile products that require gentle drying modes. Various methods of drying *Spirulina* and fish roe that were used by other authors are considered. The beneficial properties of *Spirulina* and fish roe are described. A freeze-drying technology is proposed. Freeze-drying allows to get a dry product with high quality indicators and to preserve all the nutrients that were in the product before drying. The experiments on freeze-drying *Spirulina* and fish roe were conducted. The layer thickness and final drying temperature were used as variable factors.

Key words: fish roe, *Spirulina*, freeze-drying, drying temperature, layer thickness.

ВВЕДЕНИЕ

Спирулина является уникальным продуктом, известным человечеству уже не одну сотню лет. Доказана неоспоримая биологическая ценность спирулины для человека. Широкий комплекс веществ

данного продукта обуславливает его высокую функциональную активность. Спирулина обладает самыми разнообразными благоприятными свойствами. Она используется для лечения и профилактики многих заболеваний. Спирулина нашла применение в хлебобулочной промышленности,

при производстве молочных продуктов и различных функциональных напитков [Ермолаев, 2019, 2020; Köstekli et al., 2019].

Икра рыб по своему составу превосходит остальные морепродукты и считается ценным деликатесом, так как она богата йодом, витаминами А, Д, Е и другими микроэлементами. Всем известно, чем полезна икра рыбы – она поддерживает организм в тонусе, дает силу и здоровье, укрепляет сердце и сосуды, нормализует давление и помогает организму вырабатывать коллаген, делающий кожу нежной и бархатистой [Chen et al., 2020.].

Влага, содержащаяся в спирулине и икре рыб, обуславливает необходимость их сушки для продления сроков хранения. В обезвоженном состоянии спирулина и икра рыб характеризуются длительными сроками годности и занимают мало места при транспортировке и хранении. В процессе удаления влаги в спирулине и икре рыб концентрация сухих веществ повышается.

Спирулина и икра рыб являются термолабильными продуктами, которые требуют щадящих режимов сушки. Рассмотрим исследования других авторов по сушке спирулины и икры рыб, а также предложим способ для сушки данных термолабильных продуктов. На основании литературных исследований и собственных экспериментальных исследований была сформулирована цель данной работы.

Цель работы заключается в аналитическом рассмотрении различных способов сушки спирулины и икры рыб, а также проведение собственных исследований по сублимационной сушке спирулины и икры рыб. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи исследований:

– обзор литературы по теме сушки спирулины и икры рыб;

– аналитическое сопоставление результатов других авторов по сушке спирулины и икры рыб;

– проведение исследований по сублимационной сушке спирулины и икры рыб;

– подбор параметров сублимационной сушки спирулины и икры рыб, таких как температура досушивания и толщина слоя продукта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследований являются спирулина и икра рыб. Методами исследований являются аналитический и экспериментальный.

Аналитический метод исследования будет применен при анализе работ других авторов по сушке спирулины и икры рыб, так как сущность данного метода заключается в сборе данных и извлечении информации. Работы других авторов интересны с позиций режимов и технологии сушки спирулины и икры рыб. Экспериментальный метод исследований базируется на проведении собственных экспериментов по сушке спирулины и икры рыб [İnanlı et al., 2019].

Аналитический и экспериментальный методы исследований дополняют друг друга и позволяют системно подойти к проведению исследований. Аналитический метод позволил определить, что для сушки спирулины и икры рыб одним из самых лучших способов является сублимационная сушка. Поэтому собственные экспериментальные исследования мы проводили на сублимационной сушильной установке «Иней-6М».

Аналитический метод помог определить новизну работы. На основании проведения обзора литературы по сушке спирулины и икры рыб было установлено, что спирулину и икру рыб не сушили с помо-

щью сублимационного способа сушки. При этом что именно сублимационный способ сушки сохраняет все качественные показатели пищевых продуктов и сырья максимально приближенными к нативным. Поэтому экспериментальные исследования были направлены на исследования сублимационной сушки спирулины и икры рыб. Новизна данной работы заключается в исследовании сублимационной сушки спирулины и икры рыб.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для сокращения времени сушки спирулины процесс осуществляют нагретым воздухом. В одной из работ [Курсеитова, 2013] рассматривается кинетика сушки спирулины нагретым воздухом – так называемая конвективная сушка. Температура сушильного агента при этом составляла 45–59°C, а удельная нагрузка – 0,56–1,67 кг/м². На рисунке 1 приведены зависимости продолжительности конвективной сушки спирулины при температуре воздуха 45, 57

и 59°C и при различной удельной нагрузке продукта.

Между температурой сушильного агента, удельной нагрузкой продукта и продолжительностью обезвоживания в указанных интервалах была установлена линейная зависимость. Авторами было установлено, что повышение температуры сушильного агента влечет за собой сокращение продолжительности сушки спирулины в среднем в 1,4 раза, а увеличение удельной нагрузки продукта обуславливает повышение продолжительности обезвоживания на 5%.

Известны исследования по распылительной сушке биомассы спирулины (*Spirulina platensis*). Исходное содержание влаги исследуемой биомассы составляло 14%. Обезвоживание осуществлялось нагретым воздухом с температурой 120–160°C в шарообразной камере, диаметром 0,05 м. На рисунке 2 приведены графики зависимости массы и температуры от продолжительности процесса распылительной сушки биомассы спирулины [Переяславцева, Малецкая, 2008].

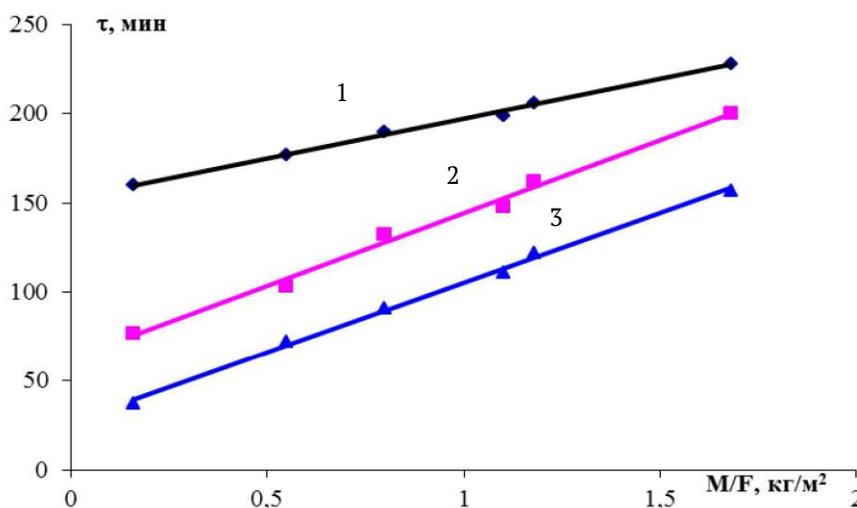


Рис. 1. Зависимость продолжительности конвективной сушки спирулины от величины удельной нагрузки продукта при температуре сушильного агента: 1 – 45°C; 2 – 57°C; 3 – 59°C

Fig. 1. Dependence of the duration of *Spirulina* convective drying on the value of the specific load of the product at the temperature of the drying agent: 1 – 45°C; 2 – 57°C; 3 – 59°C

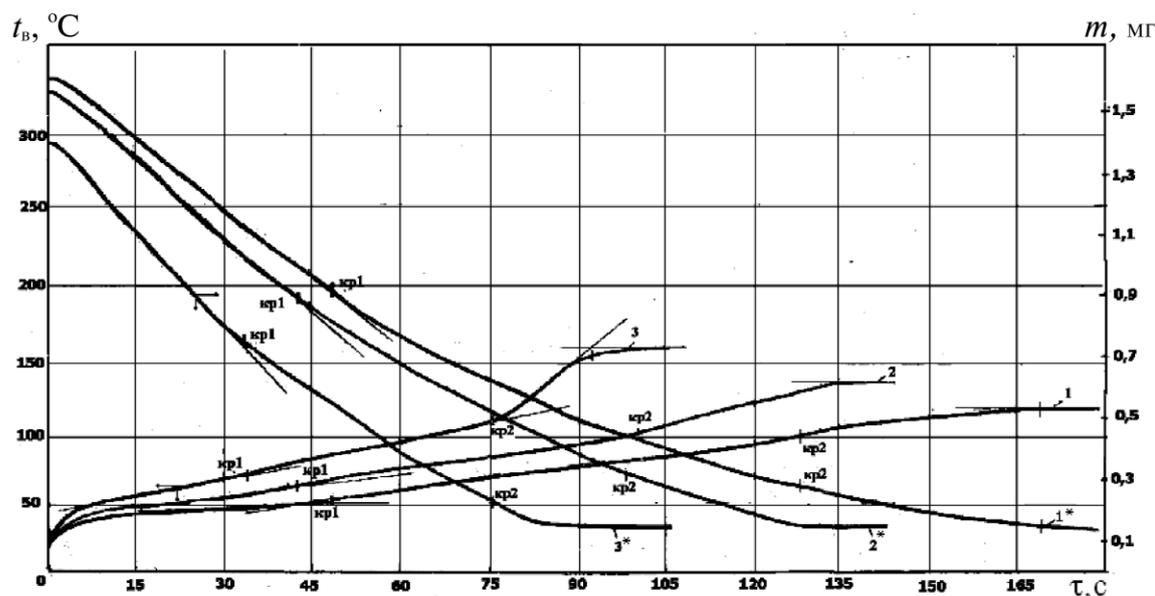


Рис. 2. Графики зависимости температуры (1, 2, 3) и массы (1*, 2*, 3*) от продолжительности сушки биомассы спирулины при температуре в камере: 1 – 120°C; 2 – 140°C; 3 – 160°C

Fig. 2. Graphs of the dependence of temperature (1, 2, 3) and mass (1*, 2*, 3*) on the duration of drying of *Spirulina* biomass at a temperature in the chamber: 1 – 120°C; 2 – 140°C; 3 – 160°C

На графиках изменения массы можно проследить стадию испарения, протекающую при температуре равновесного испарения, которая близка к температуре мокрого термометра. При температуре воздуха в камере 120°C на стадии испарения температура практически не повышается, но при температурах теплоносителя 140 и 160°C наблюдалось некоторое повышение температуры капель продукта в данном периоде.

Продолжительность стадии испарения составляет порядка 30–35% от общего времени обезвоживания. На данном этапе удаляется до 45% влаги из биомассы спирулины. Точка кр1 соответствует завершению стадии испарения и началу стадии коркообразования, в которой наблюдается образование сухого слоя на поверхности капель продукта. При этом наблюдается линейное повышение температуры продукта. Процесс осуществляется до точки кр2.

После этого наступает стадия сушки, при которой происходит удаление влаги через образовавшуюся корочку. Стадия сушки

сопровождается постепенным повышением температуры продукта до значения, соответствующего температуре в камере.

На рисунке 3 приведены фотографии микроструктуры биомассы спирулины до и после распылительной сушки [Переяславцева, Малецкая, 2008].

Исходная биомасса спирулины характеризуется игольчатой структурой. После сушки частицы спирулины приобретают форму, близкую к сферической. После растворения такого порошка частицы вновь приобретают игольчатую структуру, однако эти «иглы» по длине заметно меньше, чем в исходной биомассе.

Область применения сухой спирулины достаточно широка. Обезвоженная спирулина продается как самостоятельный продукт в виде таблеток и порошков, а также используется в качестве добавок в пищевые и фармацевтические продукты функционального назначения [Гордеева, 2002; Желонкин, Первушкин, Ерёмин и др., 2009; Желонкин, 2008; Рыков и др., 2018; Сиренко, Третьяков, 2005].

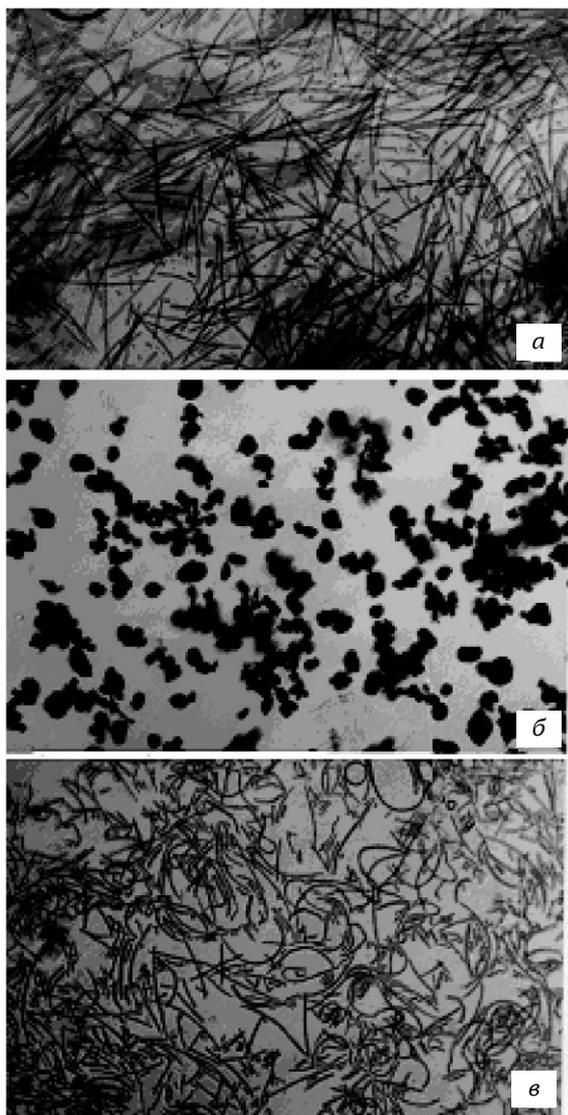


Рис. 3. Фотографии микроструктуры частиц биомассы спирулины (увеличение в 280 раз): *a* – исходная биомасса; *б* – порошкообразный продукт; *в* – продукт после растворения

Fig. 3. Photographs of the microstructure of *Spirulina* biomass particles (zoom 280x): *a* – initial biomass; *b* – powdered product; *c* – product after dissolution

В одной из работ [Ивонинская, Шилина, 2017] предлагается внесение сухой спирулины в рецептуру тестового полуфабриката. На рисунке 4 приведен витаминный состав теста до и после добавления спирулины.

Добавление спирулины в рецептуру теста позволяет повысить его пищевую ценность, увеличить количество клейкови-

ны и улучшить его органолептические свойства [Ивонинская, Шилина, 2017; Хмельева и др., 2018].

Оптимальная дозировка внесения сухой спирулины составляет 0,5% к массе муки и обеспечивает более высокие качественные показатели хлебобулочных изделий, что проявляется в изменении удельного объема, формоустойчивости и структурно-механических свойств мякиша [Иванова, Тхазеплова, 2016; Тхазеплова, Иванова, 2016].

Сухая спирулина может добавляться в такие продукты, как мороженое. Группой авторов [Болкунов и др., 2015; Болкунов и др., 2016; Болкунов, Мамаев, 2017] была разработана технология производства мороженого со спирулиновой добавкой. Данный продукт характеризовался достаточной взбитостью, гомогенностью и однородностью структуры. По органолептическим показателям он не уступал контрольному образцу без добавки, однако его биологическая ценность была выше. При этом не требуется модификаций в технологической линии и установки дополнительного оборудования в производстве такого мороженого.

Икра рыб представляет собой ценный продукт, получаемый путем обработки ястыков рыбы и имеющий высокие питательные и вкусовые качества [Дементьева, Богданов, 2017; Зайцева и др., 2013; Рубцова, Копыленко, 2009]. Икра содержит в себе достаточно большое количество белка – 20-25%, что является один из значимых критериев пищевых продуктов [Ахмерова и др., 2012; Лыков, 1970]. Незаменимые кислоты, содержащиеся в икре, представляют собой особую ценность [Ким и др., 2016; Менчинская, Лебская, 2015]. Они не могут синтезироваться в организме человека и поступают в него только с пищей.

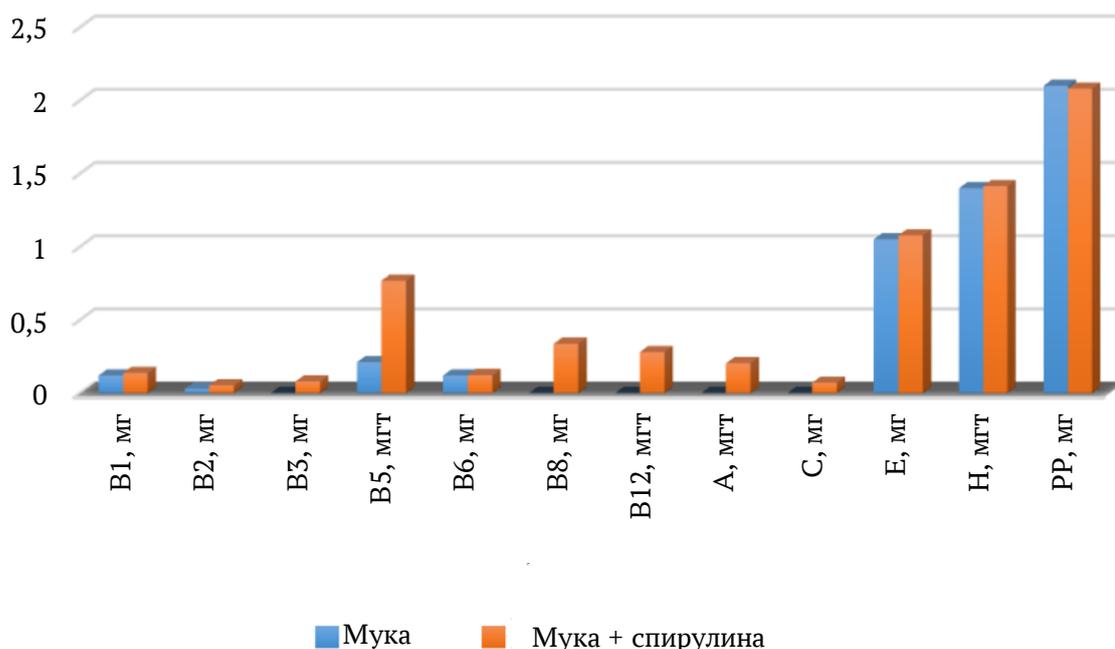


Рис. 4. Витаминный состав теста до и после добавления сухой спирулины

Fig. 4. Vitamin composition of the dough before and after adding dry *Spirulina*

Для сравнения – сумма незаменимых аминокислот в идеальном белке составляет 36 г/100 г. В икре толстолобика, сазаны и мойвы этот показатель равен соответственно 44,8; 43,3; 44,7 г/100 г. Таким образом, сумма незаменимых аминокислот в икре рыбы превышает данный показатель в идеальном белке. В частности, например, в икре мойвы содержание лизина в два раза выше, чем в идеальном белке. Лизин участвует в процессе кроветворения, стимулирует умственные способности, подавляет рост вирусов, поддерживает иммунную систему и способствует регенерации тканей.

В белках икры толстолобика отмечено достаточно большое количество лейцина. Данная кислота принимает участие в обеспечении азотистого баланса, необходимого для белкового и углеводного обмена, способствует повышению работоспособности и лучшему заживлению ран [Chang, 1978].

Что касается икры сазана, то по сравнению с остальными представленными рыбами в ней отмечено высокое содержание метионина с цистином. Метионин принимает участие в биосинтезе адреналина и холина, а также в процессе формирования коллагена. Он способствует активации гормонов, ферментов и витаминов и снижает уровень холестерина в крови. Цистин входит в состав иммуноглобулина и инсулина и обладает антиоксидантными свойствами [Садовникова, Беликов, 1978].

Липиды, входящие в состав икры рыб, могут использоваться в качестве природного эмульгатора [Абрамова, Радыгина, 2003; Ахмерова, Хамзина, 2011]. При этом биологическая эффективность липидов зависит от особенностей их жирнокислотного состава. В таблице 1 приведен жирнокислотный состав липидов икры толстолобика и рекомендуемые нормы потребления [Менчинская, Лебская, 2015].

Таблица 1. Жирнокислотный состав липидов икры толстолобика

Table 1. Fatty acid composition of lipids in silver carp caviar

Наименование жирных кислот	Содержание жирных кислот, % от суммы жирных кислот	Рекомендуемая норма потребления, г/сутки
Насыщенные, в т. ч.	42,0	25,0
Лауриновая	0,05	-
Миристиновая	1,41	-
Пентадекановая	0,35	-
Пальмитиновая	27,53	-
Гептадекановая	1,09	-
Стеариновая	9,84	-
Арахидовая	0,13	-
Генеикозановая	0,24	-
Бегеновая	0,65	-
Лигноцеридовая	0,66	-
Мононенасыщенные, в т. ч.	36,80	30,0
Миристолеиновая	0,06	-
Пентадеценная	0,18	-
Пальмитолеиновая	11,65	-
Гептадеценная	0,58	-
Олеиновая	21,92	-
Гондоевая	0,95	-
Нервоновая	1,46	-
Полиненасыщенные, в т. ч.	21,17	11,0
Гексадекадиеновая	0,37	-
Линолевая	1,48	-
Линоленовая	1,52	-
Эйкозодиеновая	0,12	-
Эйкозатриеновая	0,74	-
Арахидоновая	2,40	-
Эйкозопентаеновая	4,21	-
Докозопентаеновая	0,34	-
Докозагексаеновая	9,99	-
Неидентифицированные	0,07	-

Из представленных данных видно, что в икре толстолобика наибольшим содержанием характеризуются насыщенные жирные кислоты (42,0%). На втором месте стоят мононенасыщенные кислоты (36,8%), на третьем месте – полиненасыщенные (21,17%). Из насыщенных жирных кислот преобладает пальмитиновая кислота – ее доля равна 27,5%. Данная кислота способствует повышению уровня липопротеинов, что в свою очередь снижает содержание холестерина в крови.

Из всего многообразия рыбьей икры красная икра (лососевая) является одной из наиболее распространенных. Она содержит

множество микроэлементов (калий, фосфор, йод, железо и др.), витаминов (А, D, E), а также полиненасыщенных жирных кислот. Биологически активные вещества содержатся в ней в концентрированной форме.

Цвет икры лососей обусловлен наличием в ней таких каротиноидных пигментов – ксантофиллов, как лютеин, астаксантин и зеаксантин. Наибольшее содержание астаксантина наблюдается в икре нерки, которая обладает яркой красно-оранжевой окраской, а наименьшее – в икре горбуши, которая обладает светло-оранжевым окрасом.

Химический состав икры во многом зависит от стадии зрелости рыбы и сезона

ее вылова. Так, например, в красной икре содержание влаги варьирует от 50 до 68%, липидов – от 10 до 18%, белков – от 26 до 36%, минеральных веществ – от 0,7 до 2,5%.

Витаминный состав икры варьируется в некотором диапазоне для различных видов рыб (табл. 2) [Методы..., 2009].

Таблица 2. Витаминный состав икры рыб, мг/100 г

Table 2. Vitamin composition of fish caviar, mg/100 g

Вита-мин	Вид рыбы			
	Горбуша	Кета	Кижуч	Нерка
А	1,26	1,24	0,59	0,89
Д	0,57	0,32	0,19	0,19
Е	2,81	3,87	0,19	2,08

Из представленных рыб наибольшее содержание витаминов А и Д наблюдается в икре горбуши, а наибольшая концентрация витамина Е – в икре кеты. В целом отмечается повышенное содержание витамина А в икре тихоокеанских лососей по сравнению с другими рыбами. Ее концентрация в указанной рыбе превосходит таковую в печени трески.

Традиционным способом консервирования икры является ее посолка. Данный метод используется издавна и является самым распространенным относительно указанного продукта. В результате посолки происходит извлечение влаги как из самого продукта, так и из микроорганизмов, что влечет за собой существенное подавление их жизнедеятельности. Кроме этого происходит снижение активности воды, что также отрицательно сказывается на активности микроорганизмов, вызывающих порчу.

Разрабатывали также способ консервирования икры замораживанием до температуры -5°C [Методы..., 2009], что позволяло продлить срок хранения данного продукта до двух месяцев. Однако такой

способ обладает существенным недостатком, который выражается в заметном снижении органолептических показателей икры после дефростирования. В частности, происходит разрыв оболочки продукта и снижение вкусовых качеств, поэтому данный метод не нашел широкого применения в пищевой промышленности.

В качестве консервирующего агента помимо поваренной соли применяют также другие вещества, в частности сорбиновую кислоту и уротропин. Первый реагент служит ингибитором гидролиза белков и липидов и обладает заметным действием против грибков и дрожжей. Вторым компонентом проявляет сильное дезинфицирующее действие, способное отщеплять формальдегид. При этом установлено, что наиболее благоприятный эффект наблюдается при внесении в икру смеси данных реагентов в соотношении 50 : 50% при концентрации смеси 0,2%.

Имеются также сведения о том, что для консервирования икры применялась пастеризация продукта [Методы..., 2009; Рубцова, 2009]. В ходе исследований был разработан способ пастеризации кетовой икры при температуре 65°C в течение 1 ч. В результате такой обработки происходит уничтожение вегетативной микрофлоры и снижение активности автолитических процессов. При этом удается продлить сроки хранения указанной икры в два раза. Однако стоит отметить, что при термической обработке икры свыше 55°C происходит потускнение продукта. Наиболее сильно данный эффект проявляется при температуре 73°C .

В последнее время наблюдается существенное ухудшение качества лососевой икры. Это обусловлено нарушением санитарных норм производства, неправильной технологией переработки данной продукции, а также условий ее хранения.

В ИЛ «ВНИРО-ТЕСТ» были проведены исследования на предмет микробиологической порчи лососевой икры с применением консервантов и без них. По результатам исследований без консервантов икра хранилась лишь два месяца, с наличием консервантов – около восьми месяцев.

Поиском эффективных способов консервирования красной икры при помощи новых видов консервантов, а также различных технологий, обеспечивающих высокое качество данного продукта, занимались многие ученые, среди которых А.М. Теплицкий, Е.Н. Наседкина и др. Кроме того разрабатывались новые методы консервирования икры, основанные на физических принципах. К числу ученых, проводящих исследования в данной области, можно отнести Г.В. Маслову, В.А. Солинек, З.С. Репину, И.И. Лапшина и др.

Возможным способом переработки икры в продукт длительного хранения является ее сушка. Обезвоживание позволяет заметно продлить срок хранения икры без добавления консервантов. При этом стоит отметить, что высушенная икра может растираться в порошок для добавления в другие продукты и обогащения их полезными веществами. Для анализа возможности применения сушеной икры в качестве самостоятельного продукта необходимы соответствующие исследования.

Были проведены эксперименты по сублимационной сушке биологически ценного сырья на установке «Иней-6М». В качестве варьируемых факторов выступала толщина слоя и температура досушивания.

Внешний вид сублимационной сушильной установки представлен на рисунке 5.

В данной установке имеются две сушильные камеры, в которых друг на друга установлены поддоны для продуктов. Всего имеются восемь поддонов – по четыре

на каждую камеру. Скорость обезвоживания в этой установке составляет не менее 60 г/ч (при максимальной загрузке).



Рис. 5. Сублимационная сушильная установка «Иней-6М» (внешний вид)

Fig. 5. Sublimation drying unit "Iney-6M" (external appearance)

Схема вышеуказанной сушильной установки приведена на рисунке 6.

Рабочие камеры соединены трубопроводом с десублиматором, к которому также подведен трубопровод, сообщающийся с вакуум-насосом. Таким образом, в процессе работы сушильной установки воздух из камеры проходит через десублиматор, где происходит вымораживание влаги.

Вымораживание влаги осуществляется с помощью испарителя холодильной машины, размещенной в нижней части аппарата. Подвод теплоты к продукту осуществляется от инфракрасных ламп, размещенных вертикально по периферии камеры. Всего в каждой камере установлено четыре такие лампы.

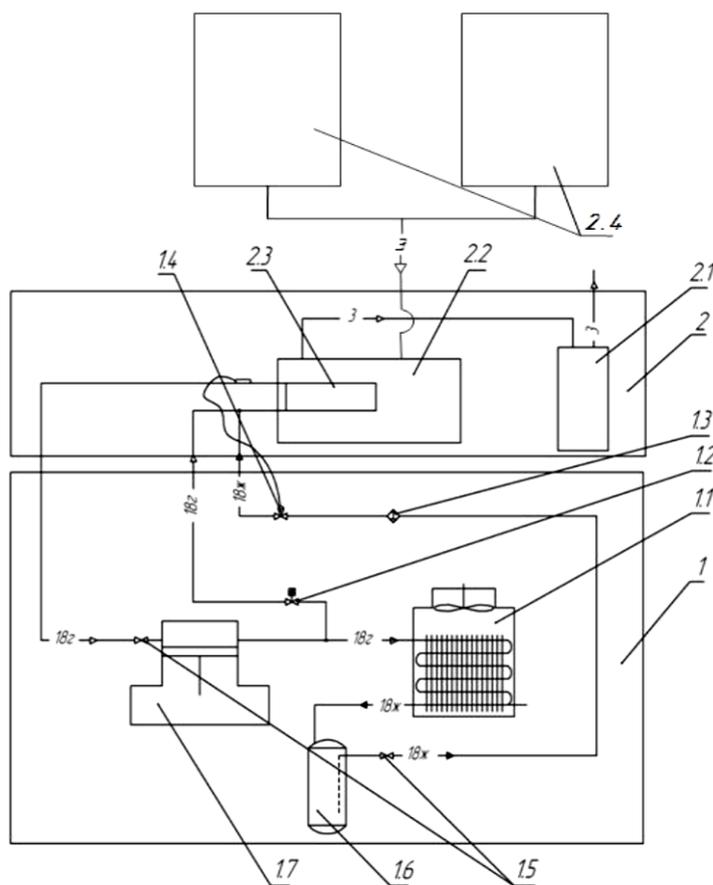


Рис. 6. Схема сублимационной сушильной установки: 1 – блок холодильной машины; 1.1 – конденсатор; 1.2 – регулирующий вентиль; 1.3 – фильтр-осушитель; 1.4 – терморегулирующий вентиль; 1.5 – запорные вентили; 1.6 – ресивер; 1.7 – компрессор; 2 – блок десублиматора; 2.1 – вакуум-насос; 2.2 – десублиматор; 2.3 – испаритель; 2.4 – сушильные камеры

Fig. 6. Diagram of a sublimation drying unit: 1 – refrigeration unit; 1.1 – condenser; 1.2 – expansion valve; 1.3 – filter dryer; 1.4 – thermostatic expansion valve; 1.5 – shut-off valves; 1.6 – receiver; 1.7 – compressor; 2 – desublimator unit; 2.1 – vacuum pump; 2.2 – desublimator; 2.3 – evaporator; 2.4 – drying chambers

В вышепредставленной установке имеется возможность регулирования остаточного давления (минимальное значение – 60 Па) и температуры в камере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология сублимационной сушки спирулины и икры рыб является перспективной. Сухие продукты сублимационной сушки имеют наилучшую степень сохранности исходных качественных показателей. Особенно важным фактором является сохранение формы лиофилизированных продуктов.

Для сублимационной сушки были подобраны температура досушивания и толщина слоя продукта. Наиболее заметное снижение продолжительности сублимационной сушки наблюдается при уменьшении толщины слоя от 10 до 5 мм. Повышение температуры досушивания дает возможность несколько сократить продолжительность удаления влаги. С целью сохранения качества и снижения времени сушки целесообразно обезвоживать продукты с температурой досушивания 40°C.

Данные исследования соответствуют специальности ВАК: 4.3.3 – Пищевые сис-

темы. Практическое использование полученных результатов заключается в том, что для длительного хранения спирулины и икры рыб можно использовать сублимационную сушку. Специалисты предприятий могут опираться на рекомендуемые параметры сублимационной сушки спирулины и икры рыб и использовать их на производстве.

ЛИТЕРАТУРА

- Абрамова Л.С., Радыгина Л.С. 2003. Эмульсионные продукты на основе рыбной икры. *Рыбное хозяйство*. № 3. С. 57–59.
- Ахмерова Е.А., Хамзина А.К. 2011. Биологическая ценность липидов икры некоторых видов рыб. *VI Московский международный конгресс «Биотехнология: состояние и перспективы развития»*. Москва. С. 160–161.
- Ахмерова Е.А., Копыленко Л.Р., Рубцова Т.Е. 2012. Пищевая ценность икры рыб. *Вестник биотехнологии и физико-химической биологии им. Ю.А. Овчинникова*. Т. 8. № 4. С. 12–20.
- Болкунов П.С., Мамаев А.В., Родина Н.Д. 2015. Изучение динамики кислотообразования образцов мороженого с различным содержанием биологически активного комплекса «спирулина-лён» в процессе хранения. *Национальная ассоциация ученых*. № 10-2 (16). С. 115–116.
- Болкунов П.С., Мамаев А.В., Родина Н.Д., Сергеева Е.Ю. 2016. Научная новизна и практическая значимость применения мороженого с биологически активным комплексом «спирулина-лён». *Евразийский союз ученых*. № 3-3 (24). С. 124–126.
- Болкунов П.С., Мамаев А.В. 2017. Теоретические и прикладные аспекты применения комплекса растительного происхождения «спирулина-лён» в технологии функционального мороженого. *Вестник аграрной науки*. № 2 (65). С. 119–124.
- Гордеева Л.Н. 2002. Биологически активные добавки в технологии безалкогольных напитков [препарат в виде порошка на основе сине-зеленых водорослей (спирулина)]. *Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал*. № 2. С. 658.
- Дементьева Н.В., Богданов В.Д. 2017. Функционально-технологические свойства икры сельди тихоокеанской. *Пищевая промышленность*. № 3. С. 36–39.
- Ермолаев В.А. 2019. Анализ эффективности сублимационной сушки спирулины. *IX Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке»*. Т. 1. Санкт-Петербург. С. 32–34.
- Ермолаев В.А. 2020. Подбор температурного режима сублимационного обезвоживания спирулины. *Вестник Международной академии холода*. № 1. С. 84–88.
- Желонкин Н.Н., Первушкин С.В., Ерёмина Н.В. и др. 2009. Разработка комбинированной лекарственной формы «спирулина-спрей» как перспективного препарата для лечения экологически обусловленных заболеваний верхних дыхательных путей. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. Т. 11. № 1-6. С. 1275–1278.
- Желонкин Н.Н. 2008. Разработка состава и технологии лекарственного средства «спирулина-спрей» для лечения заболеваний верхних дыхательных путей: *Автореферат диссертации ... канд. фарм. наук*. Пенза. 126 с.
- Зайцева Д.Е., Шейкина Т.В., Данышев М.М. 2013. Определение показателей био-

- логической ценности икры рыб. *Международная научно-техническая конференция «Инновационные технологии в пищевой промышленности: наука, образование и производство»*. С. 382–385.
- Иванова З.А., Тхазеплова Ф.Х. 2016. Влияние спирулины на показатели качества хлебобулочных изделий из ячменной и пшеничной муки. *Успехи современной науки и образования*. Т. 5. № 10. С. 24–26.
- Ивонинская Д.А., Шилина А.А. 2017. Обоснование внесения биологически активной добавки – спирулина в рецептуру замороженного тестового полуфабриката. *Вестник молодежной науки*. № 3 (10). С. 13.
- Ким Г.Н., Дементьева Н.В., Богданов В.Д. 2016. Сравнительное исследование пищевой ценности икры рыб тихоокеанского бассейна. *Рыбное хозяйство*. № 3. С. 102–106.
- Курсеитова Э.С. 2013. Исследование факторов, влияющих на процесс сушки спирулины. *Сборник ДГТУ, КГМТУ*. В. 4. С. 86–88.
- Лыков М.В. 1970. Сушка в химической промышленности. Москва: Химия. 429 с.
- Менчинская А.А., Лебская Т.К. 2015. Особенности биологической ценности белков икры мойвы и сазана. *Материалы международной научно-практической конференции «Современные эколого-биологические и химические исследования, техника и технология производств»*. В 2-х частях. Мурманский государственный технический университет. Ч. 2. С. 145–149.
- Менчинская А.А., Лебская Т.К. 2015. Пищевая и биологическая ценность икры толстолобика. *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. Т. 1. № 1. С. 1–7.
- Методы консервирования икры лососевых рыб 2009. *Рыбпром: технологии и оборудование для переработки водных биоресурсов*. № 1. С. 12–13.
- Переяславцева Е.А., Малецкая К.Д. 2008. Особенности процесса распылительной сушки высоковлажной биомассы *Spirulina platensis*. *Промышленная теплотехника*. Т. 30. № 3. С. 16–20.
- Рубцова Т.Е., Копыленко Л.Р. 2009. Пищевая ценность икры лососевых рыб. *Рыбпром: технологии и оборудование для переработки водных биоресурсов*. № 1. С. 8–11.
- Рубцова Т.Е. 2009. Технология консервирования икры лососевых рыб без консервантов. *Рыбпром: технологии и оборудование для переработки водных биоресурсов*. № 1. С. 32.
- Рыков А.М., Симоненкова А.П., Сафронова О.В., Евдокимова О.В. 2018. Функциональные продукты питания на базе фитонутриентов микроводоросли спирулина *Spirulina (Arthrospira platensis)*. *Материалы I Национальной научно-технической конференции с международным участием «Инновационные и ресурсосберегающие технологии продуктов питания»*. EDN: XWKDQT.
- Садовникова М.С., Беликов В.М. 1978. Пути применения аминокислот в промышленности. *Успехи химии*. Т. 47. Вып. 2. С. 357–383.
- Сиренко Л.А., Третьяков О.Л. 2005. Спирулина и ее использование в биотехнологии. *Экология моря*. Т. 70. С. 42–48.
- Тхазеплова Ф.Х., Иванова З.А. 2016. Влияние внесения спирулины на процесс черствения хлебобулочных изделий из пшенично-ячменной муки. *Успехи современной науки и образования*. Т. 5. № 10. С. 41–43.
- Хмельёва Е.В., Березина Н.А., Румянцева В.В., Осипова Г.А. 2018. Использо-

вание микроводоросли спирулина в технологии зернового хлеба. *Хлебпродукты*. № 8. С. 50–53.

- Chang T.W. 1978. Leucine inhibits oxidation of glucose and pyruvate in skeletal muscle during fasting. *Journal of Biological Chemistry*. V. 253 (10). P. 3696–3701.
- Chen Y.W., Cai W.Q., Shi Y.G. 2020. Effects of different salt concentrations and vacuum packaging on the shelf stability of Russian sturgeon (*Acipenser gueldenstaedti*) stored at 4 °C. *Food Control*. Vol. 109. Article № 106865.
- İnanlı A.G., Çoban Ö.E., Yılmaz Ö. 2019. Assessment of vitamin compositions and cholesterol levels of carp (*Cyprinus carpio carpio*) and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) caviars. *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. Vol. 36(3). P. 293–299.
- Köstekli B., Keskin I., Erdem M.E. 2019. Determination of quality changes of hot smoked rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum 1792) fillets kept in the deep freeze for different storage time periods. *Fresenius Environmental Bulletin*. Vol. 28(8). P. 5962–5972.
- Abramova L.S., Radygina L.S. 2003. Emulsion products based on fish roe. *Rybnoe hozyajstvo (Fisheries Journal)*. № 3. P. 57–59 (in Russian).
- Akhmerova E.A., Khamzina A.K. 2011. Biological value of lipids in roe of some fish species. *VI Moscow International Congress “Biotechnology: Status and Development Prospects”*. Moscow. P. 160–161 (in Russian).
- Akhmerova E.A., Kopylenko L.R., Rubtsova T.E. 2012. Nutritional value of fish roe. *Vestnik biotekhnologii i fiziko-himicheskoy biologii im. Yu.A. Ovchinnikova* (Yu.A. Ovchinnikov Bulletin of Biotechnology and Physical and Chemical Biology). Vol. 8. № 4. P. 12–20 (in Russian).
- Bolkunov P.S., Mamaev A.V., Rodina N.D. 2015. Study of the dynamics of acid formation of ice cream samples with different contents of the biologically active complex “spirulina-flax” during storage. *Nacional'naya Associaciya Uchenyh (National Association of Scientists)*. № 10-2 (16). P. 115–116 (in Russian).
- Bolkunov P.S., Mamaev A.V., Rodina N.D., Sergeeva E.Yu. 2016. Scientific novelty and practical significance of using ice cream with the biologically active complex “spirulina-flax”. *Evrazijskij soyuz uchenyh (Eurasian Union of Scientists)*. № 3-3 (24). P. 124–126 (in Russian).
- Bolkunov P.S., Mamaev A.V. 2017. Theoretical and applied aspects of using the plant-based complex “spirulina-flax” in functional ice cream technology. *Vestnik agrarnoj nauki (Bulletin of Agrarian Science)*. № 2 (65). P. 119–124 (in Russian).
- Gordeeva L.N. 2002. Biologically active additives in soft drink technology [a powder preparation based on blue-green algae (*Spirulina*)]. *Pishchevaya i pererabatyvayushchaya promyshlennost'. Referativnyj zhurnal (Food and Processing Industry. Abstract Journal)*. № 2. P. 658 (in Russian).
- Dementeva N.V., Bogdanov V.D. 2017. Functional and technological properties of Pacific herring caviar. *Pishchevaya promyshlennost' (Food Industry)*. № 3. P. 36–39 (in Russian).
- Ermolaev V.A. 2019. Analysis of the efficiency of freeze-drying of *Spirulina*. *IX International scientific and technical conference “Low-Temperature and Food Technologies in the 21st Century”*. T. I. St. Petersburg. P. 32–34 (in Russian).
- Ermolaev V.A. 2020. Selection of temperature conditions for freeze-drying of *Spirulina*.

REFERENCES

- Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda (Bulletin of the International Academy of Refrigeration)*. № 1. P. 84–88 (in Russian).
- Zhelonkin N.N., Pervushkin S.V., Eremina N.V. et al. 2009. Development of a combined dosage form “spirulina-spray” as a promising drug for the treatment of environmentally induced diseases of the upper respiratory tract. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk (Izvestia of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences)*. Vol. 11. № 1-6. P. 1275–1278 (in Russian).
- Zhelonkin N.N. 2008. Development of the composition and technology of the drug “spirulina-spray” for the treatment of upper respiratory tract diseases. *Abstract of the candidacy dissertation for pharmaceutical sciences*. Pyatigorsk. 126 p. (in Russian).
- Zaitseva D.E., Sheykina T.V., Danyliv M.M. 2013. Determination of indicators of biological value of fish eggs. *Proceedings of the International scientific and technical conference “Innovative technologies in the food industry: science, education and production”*. P. 382–385 (in Russian).
- Ivanova Z.A., Tkhazeplova F.Kh. 2016. The effect of *Spirulina* on the quality indicators of bakery products made from barley and wheat flour. *Uspekhi sovremennoj nauki i obrazovaniya (Advances in Modern Science and Education)*. Vol. 5. № 10. P. 24–26 (in Russian).
- Ivoninskaya D.A., Shilina A.A. 2017. Justification for the introduction of a biologically active additive – *Spirulina* into the formulation of a frozen dough semi-finished product. *Vestnik molodezhnoj nauki (Bulletin of Youth Science)*. № 3 (10). P. 13 (in Russian).
- Kim G.N., Dementyeva N.V., Bogdanov V.D. 2016. Comparative study of the nutritional value of Pacific fish roe. *Rybnoe hozyajstvo (Fisheries Journal)*. № 3. P. 102–106 (in Russian).
- Kurseitova E.S. 2013. Study of factors influencing the drying process of *Spirulina*. *Proceedings of DSTU. KGMTU Publ.* Vol. 4. P. 86–88 (in Russian).
- Lykov M.V. 1970. Drying in the chemical industry. Moscow: Chemistry Publ. 429 p. (in Russian).
- Menchinskaya A.A., Lebskaya T.K. 2015. Features of the biological value of proteins in capelin and carp caviar. *Proceedings of the International scientific and practical conference “Modern ecological, biological and chemical research, engineering and production technology”* in 2 parts. Murmansk State Technical University Publ. Part 2. P. 145–149 (in Russian).
- Menchinskaya A.A., Lebskaya T.K. 2015. Food and biological value of silver carp caviar. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii (Journal of Science and Education of the North-West of Russia)*. V.1. № 1. P. 1–7 (in Russian).
- Methods of preserving salmon caviar. 2009. *Rybprom: tekhnologii i oborudovanie dlya pererabotki vodnyh bioresursov (Fish Industry: Technologies and Equipment for Processing Aquatic Bioresources)*. № 1. P. 12–13 (in Russian).
- Pereyaslavtseva E.A., Maletskaya K.D. 2008. Features of the spray drying process of high-moisture biomass of *Spirulina platensis*. *Promyshlennaya teplotekhnika (Industrial Heat Engineering)*. Vol. 30. № 3. P. 16–20 (in Russian).
- Rubtsova T.E., Kopylenko L.R. 2009. Nutritional value of salmon caviar. *Rybprom: tekhnologii i oborudovanie dlya pererabotki vodnyh bioresursov (Rybprom: Technologies and Equipment for Processing Aquatic Bioresources)*. № 1. P. 8–11 (in Russian).
- Rubtsova T.E. 2009. Technology of preserving salmon caviar without preservatives.

- Rybprom: tekhnologii i oborudovanie dlya pererabotki vodnyh bioresursov (Rybprom: Technologies and Equipment for Processing Aquatic Bioresources)*. № 1. P. 32 (in Russian).
- Rykov A.M., Simonenkova A.P., Safronova O.V., Evdokimova O.V. 2018. Functional food on the basis of phytonutrients spirulina microalgae *Spirulina (Arthrospira platensis)*. *Proceedings of the I National scientific and technical conference with international participation "Innovative and resource-saving technologies of food products"*. EDN: XWKDQT (in Russian).
- Sadovnikova M.S., Belikov V.M. 1978. Ways of using amino acids in industry. *Uspekhi himii. (Advances in Chemistry)*. Vol. 47. Issue 2. P. 357–383 (in Russian).
- Sirenko L.A., Tretyakov O.L. 2005. *Spirulina* and its use in biotechnology. *Ekologiya moray (Ecology of the Sea)*. Vol. 70. P. 42–48 (in Russian).
- Tkhazeplova F.Kh., Ivanova Z.A. 2016. The effect of adding *Spirulina* on the staling process of bakery products made from wheat and barley flour. *Uspekhi sovremennoj nauki i obrazovaniya (Advances in Modern Science and Education)*. Vol. 5. № 10. P. 41–43 (in Russian).
- Khmeleva E.V., Berezina N.A., Rumyantseva V.V., Osipova G.A. 2018. Use of *Spirulina* microalgae in grain bread technology. *Hleboprodukty (Bread Products)*. № 8. P. 50–53 (in Russian).
- Chang T.W. 1978. Leucine inhibits oxidation of glucose and pyruvate in skeletal muscle during fasting. *Journal of Biological Chemistry*. Vol. 253 (10). P. 3696–3701.
- Chen Y.W., Cai W.Q., Shi, Y.G. 2020. Effects of different salt concentrations and vacuum packaging on the shelf stability of Russian sturgeon (*Acipenser gueldenstaedti*) stored at 4 °C. *Food Control*. Vol. 109. Article 106865.
- İnanlı A.G., Çoban Ö.E., Yılmaz Ö. 2019. Assessment of vitamin compositions and cholesterol levels of carp (*Cyprinus carpio carpio*) and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) caviars. *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. Vol. 36(3). P. 293–299.
- Köstekli B., Keskin I., Erdem M.E. 2019. Determination of quality changes of hot smoked rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum 1792) fillets kept in the deep freeze for different storage time periods. *Fresenius Environmental Bulletin*. Vol. 28(8). P. 5962–5972.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ермолаев Владимир Александрович – Кузбасский государственный аграрный университет им. В.Н. Полежкова; 650056, Россия, Кемерово; доктор технических наук, доцент, профессор кафедры биотехнологий и производства продуктов питания; ermolaevvla@rambler.ru. SPIN-код: 5221-6016, Author ID: 561058; Scopus ID: 57190978513.

Ermolaev Vladimir Alexandrovich – Kuzbass State Agrarian University named after V.N. Poletskov; 650056, Russia, Kemerovo; Doctor of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Biotechnology and Food Production Chair; ermolaevvla@rambler.ru. SPIN-code: 5221-6016, Author ID: 561058; Scopus ID: 57190978513.

Статья поступила в редакцию 18.12.2025; одобрена после рецензирования 23.01.2025; статья принята к публикации 20.03.2025.

The article was submitted 18.12.2025; approved after reviewing 23.01.2025; accepted for publication 20.03.2025.

Для цитирования: Ермолаев В.А. 2025. Анализ способов сушки спирулины и икры рыб. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. Вып. 71. С. 46–60. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2025-71-46-60>.

For citation: Ermolaev V.A. 2025. Analysis of *Spirulina* and fish roe drying methods. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (Bulletin of Kamchatka State Technical University)*. Iss. 71. P. 46–60 (in Russian). <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2025-71-46-60>.

Научная статья

УДК [502.51:628.54]+543.544

DOI: 10.17217/2079-0333-2025-71-61-71

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Надвоцкая В.В.¹, Тимофеев В.В.²

¹ Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, пр-кт Ленина, 46.

² Барнаульский юридический институт МВД России, г. Барнаул, ул. Чкалова, 49.

Обеспечение нормативных показателей качества питьевой воды возможно лишь при условии соблюдения высокого уровня экологических требований к состоянию поверхностных водных объектов, являющихся в нашей стране основными источниками питьевой воды для существующих в настоящее время и вновь создаваемых систем централизованного водоснабжения населенных пунктов. В работе рассматриваются вопросы, связанные с контролем техногенной загрязненности водных объектов, расположенных в черте города Бийска (Алтайский край) и на прилегающей к городу территории. Полигон исследований определен, исходя из его типичности в отношении ряда характеристик: возраста городского поселения, сроков эксплуатации технологического оборудования его промышленных предприятий, наличия централизованной системы водоснабжения, а также самого объекта исследования – поверхностных водных объектов. Приведены результаты экспериментальных исследований загрязненности поверхностных водных объектов, расположенных на указанной территории, описан разработанный авторами метод контроля загрязненности поверхностных водоемов.

Ключевые слова: загрязнение водоемов, контроль загрязненности, поверхностные воды, сточные воды, хроматография, экологическая безопасность.

Original article

CHROMATOGRAPHIC ANALYSIS APPLICATION TO CONTROL SURFACE WATER BODIES POLLUTION

Nadvotskaya V.V.¹, Timofeev V.V.²

¹ Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul, Lenin Ave. 46.

² Barnaul Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Barnaul, Chkalova Str. 49.

Ensuring the normative indicators of drinking water quality is possible only if a high level of environmental requirements for the condition of surface water bodies, which are the main sources of drinking water in our country for currently existing and newly created centralized water supply systems of settlements, are met. The paper considers issues related to the control of man-made pollution of water bodies located within Biysk (Altai Territory) and in the territory adjacent to the city. The research site is determined based on its typicality in relation to a number of characteristics: the age of an urban settlement, the service life of technological equipment of its industrial enterprises, the availability of a centralized water supply system, as well as the

object of research itself – surface water bodies. The results of experimental studies of the pollution of surface water bodies located in the specified territory are presented, and the method of controlling the pollution of surface reservoirs developed by the authors is described.

Key words: pollution of reservoirs, pollution control, surface waters, wastewater, chromatography, environmental safety.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных составляющих национальной безопасности суверенного государства в современных условиях является обеспечение населения питьевой водой необходимого для указанного применения качества и в достаточных количествах. С учетом неизбежного антропогенного воздействия на поверхностные водоемы, включающего в себя различные факторы бытового, промышленного и сельскохозяйственного загрязнения, а также естественных процессов, затрагивающих состояние водоемов, организация и обеспечение контроля загрязненности поверхностных водоемов является актуальной задачей.

Исследование предметной области показало, что непрерывно увеличивающееся по интенсивности своего воздействия загрязнение природной среды в полной мере затрагивает поверхностные воды, что позволяет определить эти процессы в качестве одного из основных факторов проблемного состояния экологии в современных условиях городских поселений и прилегающих к ним территорий.

На сегодняшний день системами централизованного водоснабжения в Российской Федерации обеспечены более тысячи поселений городского типа, что составляет около 99% от общего количества городов и около 2 000 поселков городского типа, что составляет около 81% от их общего количества. Суммарная установленная производственная мощность указанных сооружений достигает на сегодняшний

день 102,5 млн м³/сут, на долю коммунальных водопроводов из них приходится 53,1 млн м³/сут.

Учитывая относительно стабильное состояние основных водопроводных сооружений, следует отметить важность стабильности состояния самого источника воды, поскольку лимитирование общей производительности системы водоснабжения может наступить именно по причине его деградации или недопустимого снижения качества подаваемой воды.

Источниками воды для систем централизованного водоснабжения в нашей стране являются преимущественно поверхностные воды, доля которых в общем объеме водозабора составляет 68%. Подземные источники, в свою очередь, обеспечивают остальные 32% общего объема.

В этой связи следует отдельно отметить, что практически все поверхностные источники водоснабжения в последние годы по различным причинам подвергались существенному воздействию вредных антропогенных факторов. Загрязнение подземных вод также присутствует повсеместно, а его степень в последние годы имеет тенденцию заметного прогрессирования. В качестве основных источников загрязнения выступают сточные и производственные воды, непосредственно попадающие в поверхностные водоемы и проникающие в водоносные горизонты подземных пород. В настоящее время в силу сложившихся обстоятельств воды свыше 90% поверхностных водоемов и более 30% подземных источников вынуждены подвергаться раз-

личной дополнительной обработке с целью удаления нежелательных и вредных примесей [Бактыбаева, 2018; Трофимчук, 2023].

Состав технологических операций, входящих в процесс очистки воды, в основном определяется исходным качеством воды природного источника, сведения о котором получают, исходя из организованного и непрерывно выполняемого процесса его контроля. Средний состав воды поверхностного источника является исходной информацией для принятия принципиального решения о ее пригодности для использования в системе водоснабжения и определяет конструкцию водоочистных сооружений, в то время как текущие данные о загрязненности источника определяют конкретные технологические операции водоочистки и режимы их реализации, максимально компенсирующие либо устраняющие последствия отклонения текущего состава воды от среднего. В современных системах водоочистки возможно формирование рациональной схемы очистки воды за счет оптимизации технологической цепочки операций, в зависимости от качественного состава и количественных показателей загрязняющих веществ.

Под загрязнением поверхностных вод понимают всевозможные изменения физических, химических и биологических свойств воды водоемов вследствие естественных причин – например, сезонных процессов круговорота воды в окружающей среде, и антропогенных – например, сброса в них жидких, твердых и газообразных веществ, либо сочетание этих причин [Хурина и др., 2010].

Основным источником загрязнения поверхностных водных объектов являются недостаточно очищенные бытовые и промышленные сточные воды. Своим присутствием в водоеме они оказывают существенное влияние на его режим. Их незначи-

тельное воздействие ведет к негативным последствиям и обуславливает заметные экологические изменения в водоеме [Хурина и др., 2010; Ерофеева, Аникина, 2021].

Органические вещества загрязняющих стоков подвергаются деструкции во всех слоях водной массы и, прежде чем опуститься на дно, в основном оказываются в стадии минерализации вследствие деятельности гидробионтов и бактерий, присутствующих в водоеме. Процессы естественного старения водоемов и изменения состава воды характеризуются невысокой скоростью своего течения и могут быть своевременно выявлены и скомпенсированы как в ходе экологического мониторинга и контроля состояния водоема, так и в процессе контроля технологического процесса водоочистки на его начальном этапе.

С загрязнением химическими веществами ситуация обстоит совершенно иным образом. Не являясь участниками цепочки переработки бактериями загрязняющих веществ естественного происхождения, химические вещества остаются в водоеме на длительное время, делая воду данных водоемов опасной для использования, нанося ущерб народному хозяйству, здоровью и безопасности населения, дополнительно создавая неудобства для процесса водоочистки.

Своевременная диагностика их присутствия в поверхностном водоеме доступными и апробированными методами позволяет эффективно решить задачу контроля. А поскольку загрязнение может случиться неожиданно и единомоментно, то и метод контроля этого загрязнения должен обладать свойством оперативности его выполнения, быть экономически рациональным и надежным в отношении достоверности результатов контроля. Исходя из целей исследования, состоящих в наработке данных по контролю загряз-

ненности поверхностных водных объектов с использованием метода хроматографического анализа была реализована эмпирическая часть настоящего исследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальная часть исследования включала в себя контроль техногенной загрязненности поверхностных водных объектов, расположенных в черте города Бийска (Алтайский край) и на прилегающей к городу территории. Полигон исследований определен, исходя из его типичности в отношении ряда характеристик: солидного возраста городского поселения, наличия развитой многоотраслевой промышленности, сроков эксплуатации технологического оборудования его промышленных предприятий, наличия централизованной системы водоснабжения, а также самого объекта исследования – поверхностных водных объектов. В качестве контролируемого в ходе исследования загрязняющего вещества рассматривался бензапирен. Его выбор определялся рядом причин.

Пристальное внимание, уделяемое в современных условиях экологической безопасности населения, ориентировано в качестве конечной цели на формирование вблизи от населенных пунктов и в них самих среды, окружающей человека, защищенной от негативных факторов влияния. В этой связи поверхностные водоемы, являясь и народно-хозяйственными объектами, и местами отдыха горожан, имеют особую привлекательность в качестве объекта контроля.

Бензапирен входит в группу полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), представляющих наибольшую опасность для здоровья населения. Он обладает самой высокой канцерогенной и мутагенной активностью из типичных ПАУ и поэтому включен в группу шести

приоритетных ПАУ, которые в соответствии с рекомендациями ВОЗ (Всемирной организации здравоохранения) должны контролироваться в природных поверхностных водах. Бензапирен является биомаркером всего семейства ПАУ, причем самым опасным. Основные антропогенные источники ПАУ можно разделить на стационарные, т. е. промышленные выбросы производств, а также отопительных систем и предприятий теплоэнергетики; и передвижные, т. е. транспорт, выбросы которого распространяются на значительно большие пространства. Повышенному риску загрязнения бензапиреном подвержены водоисточники, расположенные в урбанизированных районах. Активно мигрируя, бензапирен легко включается в круговорот веществ в природе: с атмосферными осадками переносится далеко, попадает в водоемы, осаждаются в подземных отложениях, переходит в растения, в животных и биоаккумулируется [Шахова, 2018; Шемагонова, 2004].

Классификация ГОСТ 12.1.007-76 по степени воздействия на организм ставит бензапирен наравне с ртутью и свинцом, определяя его как вещество чрезвычайно опасное. В 2001 г. Российская Федерация приняла Стокгольмскую конвенцию о стойких органических загрязнителях, в рамках которой обязуется осуществлять на национальном и международном уровнях научные исследования, разработки, мониторинг и сотрудничество в отношении стойких органических загрязнителей по таким вопросам, как, в частности, их источники, выбросы в окружающую среду, присутствие в окружающей среде, уровни и соответствующие тенденции. Источниками загрязнения природной среды ПАУ являются практически все важнейшие отрасли промышленности, поэтому повышенному риску загрязнения бензапиреном подвер-

жены водоисточники, расположенные в урбанизированных районах [Тимофеев, Надвоцкая, 2023; Шемагонова, 2004].

Организация эффективного контроля загрязненности поверхностных вод реализуется с использованием разнообразных методов. В настоящей работе применен метод высокоэффективной жидкостной хроматографии для контроля загрязненности поверхностных вод в черте г. Бийска [Тимофеев, Надвоцкая, 2023].

Вокруг г. Бийска и в черте города разветвленная, густая сеть средних и малых рек, преимущественно со снеговым питанием, самоочищающаяся естественным образом, судя по физическим, биологическим, химическим, механическим факторам. Однако Бийск является очагом высокой загрязненности геосистемы. Исходя из результатов ежегодного мониторинга качество воды р. Бия выше г. Бийска сохранилось на уровне 2019–2021 гг. и характеризовалось 3-м классом разряда «б» как «очень загрязненная»; ниже г. Бийска качество незначительно ухудшилось от 3-го класса разряда «б» до 4-го класса разряда «а» («грязная»). На протяжении многих лет результаты анализа поверхностных вод в черте г. Бийска указывают на существенную загрязненность, основными веществами, обуславливающими загрязнение поверхностных вод, являются нефтепродукты (повторяемость превышений ПДК до 85,7%). А доля бензапирена в коэффициентах суммации контролируемых техногенных органических веществ 1 и 2 классов опасности для водоисточников является доминирующей. Поэтому исследование загрязненности поверхностных вод в черте г. Бийска наряду с выбором территории в качестве полигона исследования является актуальным [Трофимчук, 2023; Шемагонова, 2004].

Антропогенное загрязнение донных подземных и поверхностных вод, отложе-

ний рек в г. Бийске зависит от инфраструктуры промышленных предприятий, автомобильного, железнодорожного транспорта, предприятий теплоэнергетики. Порядка 200 предприятий топливной энергетики, деревообрабатывающей, химической и пищевой промышленности рассредоточены по всей территории города. Веществами, определяющими уровень загрязнения атмосферы города, являются, в первую очередь, бензапирен, взвешенные вещества, азота диоксид, углерода оксид, формальдегид.

Город Бийск пока мало газифицирован. Кроме большого количества вредных производств, в загрязнение городских экосистем и р. Бии значительный вклад вносят предприятия теплоэнергетики. ТЭЦ-1, ТЭЦ-2 и котельные загрязняют атмосферу, поверхностные воды, образуют горы золошлаковых отходов [Гусев, Гусева, 2010].

СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» установили предельно допустимые концентрации (ПДК) бензапирена в воде подземных и поверхностных водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования как 0,00001 мг/л.

Бийск богат поверхностными водами. Через него протекает р. Бия – основная водная магистраль города. Протяженность ее в пределах города 25 км. По территории Бийска протекает несколько малых рек – р. Чугунайка, р. Фурманка и р. Князевка. Питание р. Бии главным образом снеговое и дождевое. Основными факторами, формирующими качество водного бассейна, являются компоненты выбросов стационарных и передвижных источников. Река Бия загрязнена нефтепродуктами и продуктами сжигания топлива. Их содержание увеличивается в период таяния снегов и ливневых дождей, когда идет смыв за-

грязняющих веществ с почвы и прилегающих к реке территорий, которые сильно загрязнены [Гусев, Гусева, 2010; Дутт, 2012; Трофимчук, 2023].

При выборе точек отбора проб авторы руководствовались нарастанием антропогенного влияния на водные объекты (частный сектор, производственные предприятия, автомагистрали и др.). Поскольку единичная разовая концентрация бензапи-

рена может быть величиной случайной, в рамках контроля загрязненности поверхностных вод в черте г. Бийска исследовано 48 проб в период с апреля по сентябрь 2024 г. (результаты полученных концентраций приведены в таблице). Карта агломерации г. Бийска, с расположением основных предприятий загрязнителей и водных объектов, где производился отбор проб, представлена на рисунке 1.

Таблица. Данные, полученные в результате экспериментов

Table. Experimental data

Предприятия	Апрель – май	Июнь – июль	Август – сентябрь
ТЭЦ-1 (золоотвалы)	18 ПДК	норма	1 ПДК
ТЭЦ-2 (золоотвалы)	20 ПДК	1 ПДК	3 ПДК
ПО «Полиэкс»	24 ПДК	4 ПДК	8 ПДК
Олеумный завод	22 ПДК	5 ПДК	13 ПДК
ПО «Сибприбормаш»	24 ПДК	4 ПДК	16 ПДК



Рис. 1. Карта агломерации г. Бийска с расположением основных предприятий загрязнителей и водных объектов, где производился отбор проб

Fig. 1. A map of the Biysk agglomeration with the location of the main pollutant enterprises and water bodies where sampling was carried out

Выполнение комплекса химико-аналитических исследований проб проводилось на базе лаборатории хроматографического анализа АлтГТУ согласно ПНД Ф 14.1:2:4.186-02. Для экстракции бензапирена гексаном из пробы, очистки пробы и концентрирования экстракта использованы стандартный набор лабораторной посуды, весы аналитические, сухой фильтр, сушильный шкаф. Определение бензапирена выполнено методом высокоэффективной жидкостной хроматографии на приборе «Люмахром» с флуориметрическим детектором «Люмахром ФЛД 2410 Флюорат-02-2М». Нижняя граница определяемых содержаний 0,5 нг/л.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ сезонного распределения уровня загрязнения поверхностных вод, исследованных в ходе эмпирической части исследования, показал, что пробы, взятые в водоемах в весенние месяцы, соответствующие процессу сезонного снеготаяния, показали максимальный уровень бензапирена (превышение ПДК до 24 раз) во всех пробах. Данное обстоятельство складывается

вследствие перехода загрязняющих веществ, накопившихся за зиму, из снежных масс в талую воду и далее в поверхностные водоемы. Усугублению ситуации способствует локализация загрязненного снежного покрова, возникающая по причине размещения городских снегоотвалов на берегах городских и пригородных водоемов.

Самый крупный водопользователь в городе – ТЭЦ-1, сточные воды которого загрязнены бензапиреном, взвешенными веществами. Благодаря вкладу автотранспорта и транспортной развязке концентрация составляет 6–18 ПДК. Превышение ПДК в 3–20 раз зафиксировано в точке отбора проб ниже ТЭЦ-2, где отходы складываются на берегу р. Бии в виде высокого штабеля, который подмывается рекой.

Анализ проб, взятых из р. Бии в районе ПО «Полиэкс», показывает, что поверхностные воды загрязнены бензапиреном. На биологических очистных сооружениях ПО «Полиэкс» сточные воды проходят очистку, но объема очистительной системы предприятия не хватает. Содержание бензапирена – 4–24 ПДК. Хроматограмма одной из типичных проб загрязненных вод представлена на рисунке 2.

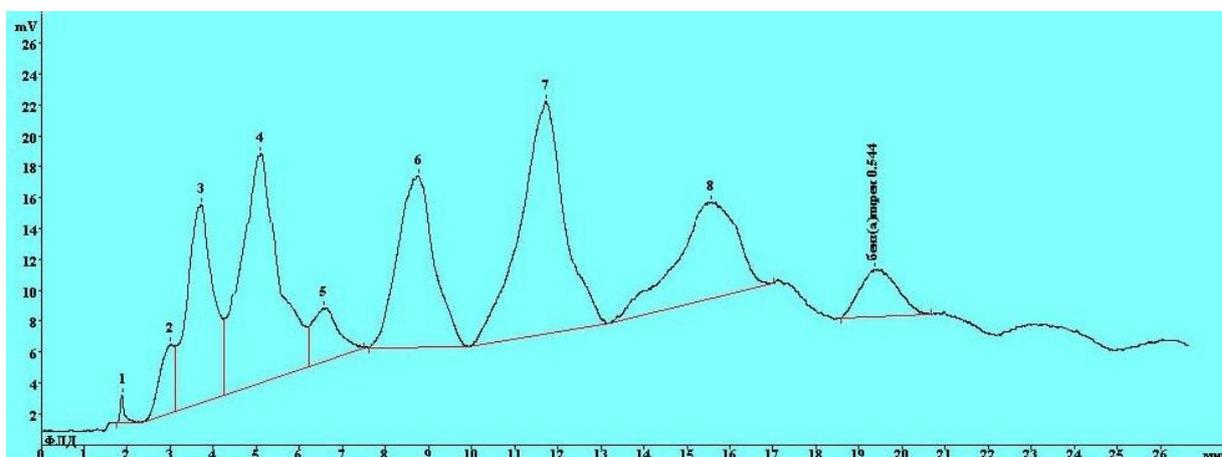


Рис. 2. Хроматограмма пробы № 8, май: бензапирен превышает ПДК более чем в 5 раз, 1–8 – следовое количественное присутствие веществ

Fig. 2. Chromatogram of sample № 8, May: benzapyrene exceeds MPC by more than 5 times, 1–8 – trace quantitative presence of substances

Сточные воды олеумного завода также загрязнены бензапиреном, концентрация в поверхностных водах составляет 5–22 ПДК.

ПО «Сибприбормаш» ежегодно сбрасывает в р. Бию более 1 млн м³ сточных вод, наибольшее загрязнение бензапиреном регистрировалось в конце апреля – в 24 раза выше ПДК.

Таким образом, бензапирен обнаружен во всех пробах. Основными источниками являются промышленные предприятия, золошлакоотвалы, автомобильный транспорт.

При анализе полученных результатов обнаружены сезонные периоды изменения содержания бензапирена в поверхностных водах г. Бийска.

Оценивая сезонную изменчивость содержания бензапирена в окружающей среде, необходимо принимать во внимание седиментацию вещества в зимний период и распределение по общей поверхности территории до весеннего таяния снега.

Поэтому наибольшая концентрация бензапирена наблюдается во время таяния

снега, когда растительный покров минимален (апрель – май), затем в августе – сентябре, меньше всего в июне – июле в связи с повышенной солнечной активностью (под действием УФ-излучения бензапирен разрушается) и воздействием на процесс разложения бензапирена микроорганизмов и растений в реках.

Результаты анализа одной из таких проб представлены на рисунке 3.

Оценка состояния поверхностных вод в черте г. Бийска показала превышение предельно допустимой нормы в течение периода апрель – сентябрь, что требует принятия мер по уменьшению содержания вредных веществ. Высокий уровень загрязненности поверхностных вод г. Бийска обусловлен многими причинами: скоплением промышленных предприятий непосредственно в черте городов, отсутствием защищенных селитебных зон, высокотехнологичных методов очистки отходов, малой газификацией города.

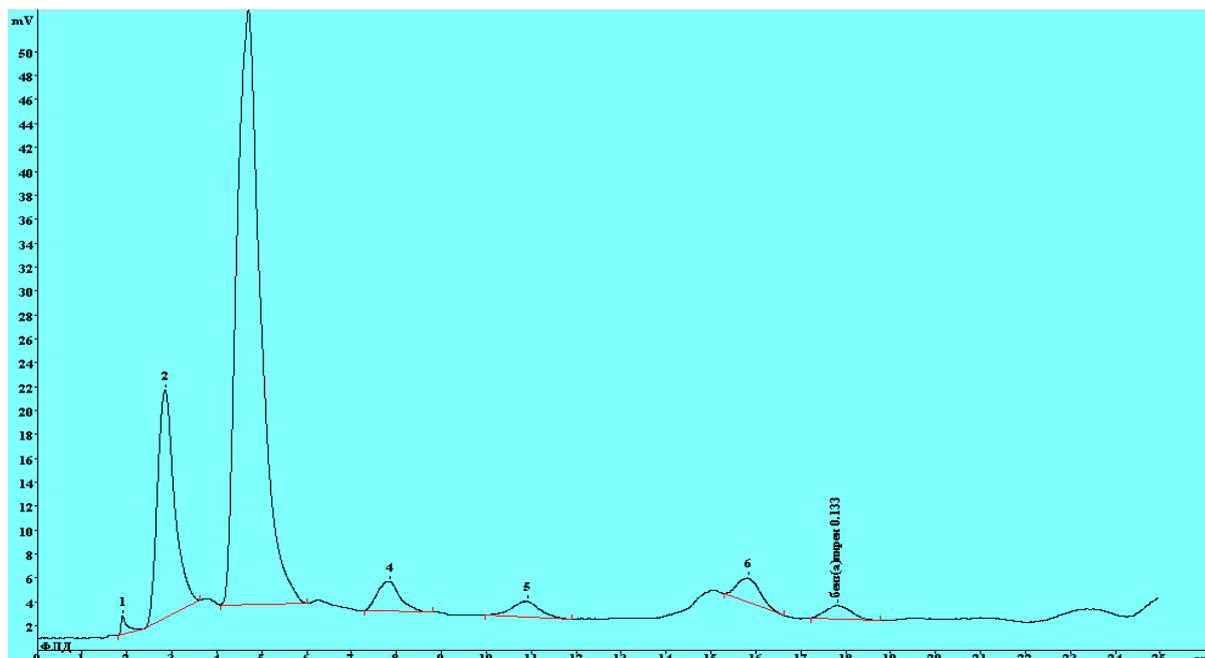


Рис. 3. Хроматограмма пробы № 3, сентябрь: бензапирен не превышает ПДК, 1–6 – следовое количественное присутствие веществ

Fig. 3. Chromatogram of sample № 3, September: benzopyrene does not exceed MPC, 1–6 – trace quantitative presence of substances

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процессы загрязнения поверхностных водоемов различными веществами антропогенного происхождения, наблюдаемые в настоящее время в ходе производственной, хозяйственной и природопользовательской деятельности человека, оказывают значительное воздействие на экосистемы водоема. Одной из естественных функций этой экосистемы является стремление к самоочищению, включающему определенную совокупность гидродинамических, физико-химических, микробиологических и гидробиологических процессов, ведущих к восстановлению состояния биологического равновесия водного объекта. Следует отметить, что указанные процессы наиболее эффективно компенсируют влияние органических загрязняющих веществ. По причине широкого разнообразия форм и групп микроорганизмов, естественной переработке подвержены практически все виды органических загрязнений. При нарушении естественных условий обитания этих микроорганизмов, подавлении их жизнедеятельности вследствие химических загрязнений, в частности, контролируемым в ходе исследования бензапиреном, кроме прямого ущерба от его присутствия в качестве загрязняющего вещества, нарушается и ход процессов самоочищения водоемов из-за подавления их гидробиологической системы.

В естественных условиях поверхностных водоемов городской и пригородной зон загрязненность их носит выраженный сезонный характер. В ходе исследования выявлена сезонная изменчивость содержания бензапирена в окружающей среде, зависящая от седиментации вещества в зимний период и активного разложения бензапирена летом.

Метод высокоэффективной жидкостной хроматографии позволил выполнить

оценку загрязненности бензапиреном поверхностных водоемов в черте г. Бийска. Бензапирен обнаружен во всех пробах, весной ожидаемо наблюдается максимальный уровень его присутствия.

В ходе выполнения исследования выяснено, что на сложившуюся неблагоприятную экологическую ситуацию по загрязнению поверхностных водных объектов г. Бийска влияет ряд факторов. В связи с этим проводятся природоохранные мероприятия по минимизации и устранению загрязнения поверхностных вод: на производственных предприятиях устанавливаются современные очистные сооружения, совершенствуется технологическое оборудование котельных. Тем не менее общая эффективность этих мер недостаточна. Вследствие чего на основании результатов исследования практически все поверхностные водоемы города можно отнести к категории «грязный – очень грязный».

ЛИТЕРАТУРА

- Бактыбаева З.Б. 2018. Оценка воздействия нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности на экологическое состояние объектов окружающей среды и здоровье населения (обзор литературы). *Медицина труда и экология человека*. № 4 (16). С. 12–26.
- ГОСТ 12.1.007-76. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности (с Изменениями № 1, 2). 2007. Москва: Стандартинформ. 7 с.
- Гусев А.И., Гусева О.И. 2010. Биогеохимическая индикация антропогенного загрязнения растительности алтайских городов. *Международный журнал экспериментального образования*. № 7. С. 17–19.

- Дутт Е.В. 2012. Оценка степени загрязненности атмосферы урбанизированных территорий (на примере города Бийска Алтайского края) бенз(а)пиреном, формальдегидом и диоксидом азота. *Вестник Томского государственного педагогического университета*. № 7 (122). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-stepeni-zagryaznennosti-atmosfery-urbanizirovannyh-territoriy-na-primere-goroda-biyska-altayskogo-kрая-benz-a-pirenom> (дата обращения: 13.11.2023).
- Ерофеева В.В., Аникина Е.В. 2021. Оценка загрязнения почв урбанизированных экосистем (на примере г. Москвы). *Международный научно-исследовательский журнал*. № 4-2 (106). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-zagryazneniya-pochv-urbanizirovannyh-ekosistem-na-primere-g-moskvy> (дата обращения: 01.02.2024).
- ПНД Ф 14.1:2:4.186-02 Определение бенз(а)пирена в пробах воды. Люмэкс. 2010. URL: <https://www.lumex.ru/metodics/16AR02.08.08-1.pdf> (дата обращения: 01.02.2024).
- Тимофеев В.В., Надвоцкая В.В. 2023. Применение хроматографического анализа для оценки загрязненности водных объектов Барнаула. *Ползуновский альманах*. АлтГТУ. № 3. С. 42–44.
- Трофимчук М.М. 2023. Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник. Ростов-на-Дону. 636 с.
- Хурина О.В., Саушкина Л.Н. Кузякина Т.И. 2010. Оценка экологического состояния пресноводной гидроэкосистемы в условиях антропогенной нагрузки. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. № 12. С. 26–32.
- Шахова Т.С. 2018. Влияние нефтеперерабатывающих заводов на эколого-геохимическую обстановку прилегающих территорий по данным изучения снегового покрова: на примере гг. Омск, Ачинск, Павлодар. *Диссертация ... канд. геол.-мин. наук*. Томск. 192 с.
- Шемагонова Е.В. 2004. Выявление источников и факторов, определяющих содержание бенз(а)пирена в воде. *Диссертация ... канд. техн. наук*. Уфа. 237 с.

REFERENCES

- Baktybayeva Z.B. 2018. Assessment of the impact of the oil refining and petrochemical industries on the ecological and hygienic condition of environmental facilities and public health (literature review). *Medicina truda i ekologiya cheloveka (Occupational Medicine and Human Ecology)*. № 4 (16). P. 12–26 (in Russian).
- GOST 12.1.007-76. The Occupational Safety Standards System (OSSS). Harmful substances. Classification and general safety requirements (as Amended № 1, 2). 2007. Moscow: Standartinform Publ. 7 p. (in Russian).
- Gusev A.I., Guseva O.I. 2010. Biogeochemical indication of anthropogenic pollution of vegetation of Altai cities. *Mezhdunarodnyj zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya (International Journal of Experimental Education)*. № 7. P. 17–19 (in Russian).
- Dutt E.V. 2012. Assessment of the degree of atmospheric pollution of urbanized territories (on the example of the city of Biysk, Altai Territory) with benz(a)pyrene, formaldehyde and nitrogen dioxide. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta (Tomsk State Pedagogical University Bulletin)*. № 7 (122). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-stepeni-zagryaznennosti-atmosfery-urbanizirovannyh-territoriy-na-primere-goroda-biyska-altayskogo-kрая-benz-a-pirenom>

- primere-goroda-biyska-altayskogo-kraya-benz-a-pirenom (accessed: 11.13.2023) (in Russian).
- Yerofeeva V.V., Anikina E.V. 2021. Assessment of soil pollution in urbanized ecosystems (on the example of Moscow). *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal (International Research Journal)*. № 4-2 (106). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-zagryazneniya-pochv-urbanizirovannyh-ekosistem-na-primere-g-moskvy> (accessed: 02.01.2024) (in Russian).
- ERD F 14.1:2:4.186-02 Determination of benz(a)pyrene in water samples. Lumex. 2010. URL: <https://www.lumex.ru/metodics/16AR02.08.08-1.pdf> (accessed: 02.01.2024).
- Timofeev V.V., Nadvotskaya V.V. 2023. Application of chromatographic analysis to assess the pollution of water bodies in Barnaul. *Polzunovskij al'manah (Polzunovsky Almanac)*. AltGTU. № 3. P. 42–44 (in Russian).
- Trofimchuk M.M. 2023. The quality of surface waters of the Russian Federation. Yearbook. Rostov-on-Don. 636 p. (in Russian).
- Hurina O.V., Saushkina L.N. Kuzyakina T.I. 2010. Assessment of the ecological state of the freshwater hydroecosystem under anthropogenic load. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (Bulletin of the Kamchatka State Technical University)*. № 12. P. 26–32 (in Russian).
- Shakhova T.S. 2018. The influence of oil refineries on the ecological and geochemical situation of adjacent territories according to the study of snow cover: on the example of Omsk, Achinsk, Pavlodar. *Candidacy dissertation for geological and mineralogical sciences*. Tomsk. 192 p. (in Russian).
- Shemagonova E.V. 2004. Identification of sources and factors determining the content of Benz(a)pyrene in water. *Candidacy dissertation for technical sciences*. Ufa. 237 p. (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Надвоцкая Валерия Валерьевна – Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова; 656038, Россия, Барнаул; кандидат педагогических наук, заместитель директора заочного института; nadvotskaya7@mail.ru. SPIN-код: 5423-6950, Author ID: 779304.

Nadvotskaya Valeria Valeryevna – Altai State Technical University named after I.I. Polzunov; 656038, Russia, Barnaul; Candidate of Pedagogical Sciences, Deputy Director of the Correspondence Institute; nadvotskaya7@mail.ru. SPIN-code: 5423-6950, Author ID: 779304.

Тимофеев Виктор Владимирович – Барнаульский юридический институт МВД России; 656038, Россия, Барнаул; кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и специальной техники; v.v.timofeev@bk.ru. SPIN-код: 3088-8210, Author ID: 773975.

Timofeev Victor Vladimirovich – Barnaul Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia; 656038, Russia, Barnaul; Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Computer Science and Special Engineering Chair; v.v.timofeev@bk.ru. SPIN-code: 3088-8210, Author ID: 773975.

Статья поступила в редакцию 24.10.2024; одобрена после рецензирования 07.02.2025; статья принята к публикации 20.03.2025.

The article was submitted 24.10.2024; approved after reviewing 07.02.2025; accepted for publication 20.03.2025.

Для цитирования: Надвоцкая В.В., Тимофеев В.В. 2025. Использование хроматографического анализа для контроля загрязненности поверхностных водных объектов. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. Вып. 71. С. 61–71. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2025-71-61-71>.

For citation: Nadvotskaya V.V., Timofeev V.V. 2025. Chromatographic analysis application to control surface water bodies pollution. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (Bulletin of Kamchatka State Technical University)*. Iss. 71. P. 61–71 (in Russian). <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2025-71-61-71>.

Научная статья

УДК 502/.504

DOI: 10.17217/2079-0333-2025-71-72-86

**ТЕХНОГЕННОЕ ВЛИЯНИЕ ПОЛУЗАТОПЛЕННЫХ И ЗАТОПЛЕННЫХ СУДОВ
НА МОРСКИЕ ПРИБРЕЖНЫЕ ВОДЫ КАМЧАТКИ
(В ТОМ ЧИСЛЕ АВАЧИНСКОЙ ГУБЫ) И СЕВЕРНЫХ КУРИЛ**

Касперович Е.В.¹, Бочкарев Н.Ю.¹, Радайкин Е.А.²¹ Камчатская дирекция по техническому обеспечению надзора на море, пр-кт Карла Маркса, 29/1.² Камчатский государственный технический университет, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35.

Представлены результаты обследования полузатопленных и затопленных судов, расположенных в районе исследования в прикамчатских водах и Северо-Курильском заливе. Цель работы – оценить влияние затопленных судов на морские воды в районе проведения исследований: акватории Авачинской губы и Северо-Курильского залива во Втором Курильском проливе, а также в протоке Озерной устья реки Камчатки. Исследования авторов выполнены на основе подводной фото- и видеосъемки, проводившейся с использованием телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов, и химического анализа отобранных проб поверхностных (морских) вод в местах расположения затопленных судов. В качестве маркерных веществ, характеризующих негативное воздействие затопленных судов на водную среду, приняты взвешенные вещества, железо общее и нефтепродукты.

Ключевые слова: взвешенные вещества, железо общее, затопленные суда, коррозия, нефтепродукты, прибрежная зона, телеуправляемый необитаемый подводный аппарат (ТНПА).

Original article

**TECHNOGENIC IMPACT OF DECOMMISSIONED SHIPS
ON THE MARINE COASTAL WATERS OF KAMCHATKA
(INCLUDING THE AVACHA BAY) AND NORTHERN KURILE ISLANDS**

Kasperovich E.V.¹, Bochkarev N.Yu.¹, Radaikin E.A.²¹ Kamchatka Directorate for Technical Support of Maritime Supervision, Karl Marks Ave. 29/1.² State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Klyuchevskaya Str. 35.

The results of survey of partially submerged and sunken ships from the waters of Kamchatka and North Kuril Gulf are presented. We aimed to assess the impact of sunken ships on the marine coastal waters in the area, including the Avacha Bay and North Kuril Gulf in the Second Kuril Strait, as well as in the Ozernaya Channel in the mouth of the Kamchatka River. We analyzed the underwater photos and videos using the remote operated underwater vehicle and also performed chemical analysis of selected samples of surface (marine) waters collected from the locations of submerged ships. Suspended substances, total iron and oil products were used as markers characterizing negative impact of sunken ships on the aquatic environment.

Key words: suspended substances, common iron, decommissioned ships, corrosion, oil products, coastal zone, remote operated underwater vehicle (ROV).

ВВЕДЕНИЕ

Скопление затонувших и брошенных судов в морских акваториях является актуальной проблемой для многих стран. Наличие металлических конструкций в морских водах оказывает негативное воздействие на водные объекты, создавая преграды для перемещения судов, оказывая влияние на функционирование морских экосистем на всех уровнях их организации, поскольку металл, из которого состоят затонувшие суда, активно подвергается коррозии в морской воде.

Морская вода является хорошо аэрированным нейтральным электролитом с высокой электропроводностью, обусловленной наличием солей с высокой депассивирующей способностью благодаря большому содержанию в ней хлоридов [Жук, 2006]. Для разрушения металлов в морской воде характерно наряду с общей равномерной коррозией наличие на поверхности глубоких коррозионных поражений – язвин.

В Камчатском крае основными местами скопления выведенных из эксплуатации судов являются Авачинская губа и протока Озерная устья реки Камчатки в поселке Усть-Камчатске, а в Сахалинской области – Северо-Курильский залив во Втором Курильском проливе. Данные водные объекты имеют высокое экономическое и рыбохозяйственное значение, так как являются водными объектами высшей и первой рыбохозяйственной категории – местами нагула и миграционных путей лососевых видов рыб. Исторически сложившееся размещение населения и производств на берегах Авачинской губы, протоки Озерной и Северо-Курильского залива, а также методы и способы ведения хозяйственной деятельности на этих территориях способствовали их многолетнему

хроническому загрязнению. Здесь многие десятилетия накапливались брошенные, выведенные из эксплуатации суда и иные плавсредства. В районе, где проводились наши исследования, основная часть выведенных из эксплуатации судов брошена на мелководье. В Авачинской губе – в бухтах Южной, Моховой, Бабьей и Раковой, а также в районе мыса Санникова, в протоке Озерной – на приливно-отливной зоне правого и левого берега протоки Озерной, а в Северо-Курильском заливе – на приливно-отливной зоне.

Особенно часто выведенные из эксплуатации и затопленные морские транспортные средства встречаются у мест базирования флота, предприятий судоремонта и иных промышленных зон. В таких районах нередко отмечается загрязнение как морских вод, так и донных отложений коррозионными продуктами с поверхности судов, в частности, соединениями железа, тяжелыми металлами, фенолами и другими поллютантами. Кроме того, выведенные из эксплуатации суда могут содержать остатки топлива, моторных и смазочных масел, льяльные воды, хладагенты судовых холодильных установок, моющие средства, остатки рыбопродукции и прочих грузов, потерявших потребительские свойства. Таким образом, размещение в водном объекте отходов производства и потребления, в том числе брошенных, выведенных из эксплуатации, полузатопленных и затопленных судов и иных плавучих средств, их частей и механизмов, может привести к причинению вреда окружающей среде.

Полузатопленные суда, особенно на участках их массового размещения (захоронения), оказывают негативное влияние на экологическое состояние водных объектов и их прибрежных защитных полос. Использование захлавленного и загрязненного побережья в рекреационных целях

(отдыха, туризма, спорта) негативно отражается на туристическом бизнесе, представляет опасность для здоровья людей. Помимо известного, местами экстремального, загрязнения нефтепродуктами донных грунтов Авачинской губы, в танках и трубопроводах затонувших судов могут сохраняться остатки топлива, в двигателях и прочих агрегатах – масла. Нефтепродукты являются наиболее массовой группой загрязняющих веществ, особенно токсичны их растворимые формы. В районах, где они часто попадают в воду, становятся заметными изменения видового состава гидробионтов [Касперович, 2011].

Наиболее чувствительные к такому воздействию организмы гибнут, другие находятся в угнетенном состоянии, иные, устойчивые к загрязнению, начинают доминировать в экосистеме [Гурвич, Шерстнев, 1994]. Негативные последствия более вероятны для придонных видов и молоди рыб в прибрежной мелководной части моря и в зонах со слабой циркуляцией воды. Особенно восприимчива к нефти развивающаяся икра рыб: растворенные фракции нефти токсичны для нее даже в очень низких (0,0002–0,01 мг/л) концентрациях. Это выражается в снижении выживаемости икры и личинок, замедлении роста личинок, уменьшении их жизнеспособности. Видовая структура беспозвоночных меняется в сторону повышения вклада в функционирование экосистемы устойчивых видов за счет снижения численности чувствительных видов бентоса (особенно иглокожих и ракообразных) [Борисов и др., 2021; Михайлова, 1991; Carls et al., 2002].

Влияние затопленных судов на поверхностные водные объекты может оказываться различными загрязняющими веществами, которые в них содержатся. Известно, что на судах рыбной промышленности используются аммиак, фреоны

(хладоны), элегаз и некоторые углеводороды. Устаревшие судовые холодильные установки работают в основном на хладагентах R12 и R22, доля аммиачных холодильных установок относительно невелика. Аммиак высокотоксичен для морских организмов, фреоны малотоксичны и мало растворимы в воде, но, попадая в атмосферу, разлагаются под воздействием ультрафиолетового излучения и способствуют распаду атмосферного озона [Метелев и др., 1971; Boardman et al., 2004].

Отходы рыбопродукции, оставшиеся в грузовых трюмах брошенных судов, содержат высокие концентрации соединений азота и фосфора, в местах их наличия отмечаются высокие значения БПК, что способствует эвтрофикации водоема [Ермолаева, Двуреченская, 2014]. Такой деградиционный процесс приводит к снижению концентрации кислорода в воде, формированию илистых донных отложений с преимущественно анаэробными микробиологическими процессами разложения, возникновению «красных» и «зеленых» приливов [Очеретяна и др., 2015; Очеретяна, 2017; Санамян и др., 2023].

В настоящей работе рассматриваются результаты обследования выведенных из эксплуатации полузатопленных и затопленных судов, в том числе с использованием телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов ФГБУ «Камчаттехмордирекция» (подведомственное Росприроднадзору учреждение) и химического анализа отобранных проб поверхностных (морских) вод в месте расположения судов в рамках федерального проекта «Генеральная уборка». Данный проект утвержден в 2021 г. по поручению М. Мишустина. Главная цель этого проекта – ликвидация экологически опасных объектов на всей территории России. Федеральным законом от 06.12.2021 г. № 395-ФЗ ратифицирована Международ-

ная конвенция об удалении затонувших судов, созданная в Найроби 18.05.2007 г. Пунктом 6 перечня поручений Президента Российской Федерации В.В. Путина от 03.11.2022 г. № Пр-2096 Правительству Российской Федерации поручено рассмотреть вопрос о включении проектов по очистке прибрежных территорий Дальнего Востока и северных территорий Камчатского края в федеральный проект «Генеральная уборка».

Федеральная служба по надзору в сфере природопользования (Росприроднадзор) является федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по федеральному государственному экологическому контролю (надзору) в отношении случаев, указанных в подпункте 2 пункта 2 статьи 109 Кодекса торгового мореплавания Российской Федерации. Так, с 2022 г. в рамках федерального проекта «Генеральная уборка» Росприроднадзор с участием подведомственных ему учреждений, включая ФГБУ «Камчаттехмордирекция», подтверждает или устанавливает наличие (отсутствие) угрозы причинения вреда (ущерба) морской среде загрязнением, связанным с затонувшим имуществом.

Практика применения телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (далее – ТНПА) при обследовании затопленных судов в Авачинской губе и Северо-Курильском заливе представлена в работе авторов [Касперович и др., 2024]. Обследование с помощью ТНПА незаменимы для изучения донных ландшафтов, видового состава и структуры бентоса, а также решения ряда других задач. Непосредственное наблюдение позволяет исследователю оценивать состояние донных сообществ в местах нахождения полузатопленных и затопленных судов. В последние десятилетия ТНПА все шире применяются

для разного рода подводных работ. Общие сведения об их использовании хорошо представлены в сети Интернет. Особое место занимает использование ТНПА в оценке морских прибрежных гидробиологических исследований [Дуленин, Кудревский, 2019].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом для работы послужили результаты обследований затопленных судов, находящихся в акватории Авачинской губы, протоке Озерной и Северо-Курильском заливе, указанные в приказе Министерства транспорта Российской Федерации от 02.06.2023 г. № 200 «Об утверждении перечня затонувшего имущества, удаление которого является обязательным в соответствии с пунктами 2 и 3 статьи 109 Кодекса торгового мореплавания Российской Федерации» и включенные в опубликованный на официальном сайте исполнительных органов государственной власти Камчатского края «Список затонувших судов и иных объектов, подлежащих удалению из акватории Авачинской губы». Карта-схема обследованных районов мест расположения затонувших судов приведена на рисунке 1. Обследования проводились в следующие периоды:

– в акватории Авачинской губы в 2022–2023 гг. В 2022 г. обследовано 23 места расположения затопленных судов (обследования проводились визуально, без использования ТНПА), в 2023 г. – 28 мест расположения затопленных судов;

– в акватории Северо-Курильского залива в 2022–2023 гг. В 2022 г. обследовано 9 мест расположения затонувших судов, в 2023 г. – 19 мест расположения затонувших судов. Обследования затонувших судов в Северо-Курильском заливе проводились визуально, без использования ТНПА;

– в акватории протоки Озерной в 2024 г. обследовано 10 мест расположения затонувших судов.

С целью обследования состояния подводной части затонувших судов, их целостности, а также определения состояния морской флоры и фауны в местах нахождения затонувших судов использовались ТНПА «ГНОМ Про» и ТНПА «Супер-ГНОМ» российского производства. С их помощью подводная часть затонувших судов фиксировалась на фото и видео. Необходимо отметить, что оценка состояния затонувших судов с использованием ТНПА производилась в случаях, когда глубина водного объекта составляла не менее 65 см.

Для первичного определения места нахождения затонувшего судна и его наличия (отсутствия) проводился анализ архивных спутниковых снимков, полученных с использованием программы Google Earth Pro в районах расположения зато-

нувших судов в Авачинской губе, протоке Озерной и Северо-Курильском заливе. У обследованных судов измерялись габариты (длина и ширина), а их географические координаты фиксировались в системе WGS-84 с помощью геодезической спутниковой аппаратуры PrinCe i90 и программного обеспечения Landstar 8.0.1, после чего наносились на карту в программе Google Earth Pro.

В местах расположения затонувших судов также проводился отбор проб природных (морских) вод по ГОСТ Р 59024-2020 (издание 2023 г.). Для проведения химических исследований в аккредитованной лаборатории ФГБУ «ЦЛАТИ по ДФО – ЦЛАТИ по Камчатскому краю» (подведомственное Росприроднадзору учреждение, уникальный номер записи об аккредитации в реестре аккредитованных лиц RA.RU.515405 от 29.07.2016) отбирали по одной пробе на одно затонувшее судно.

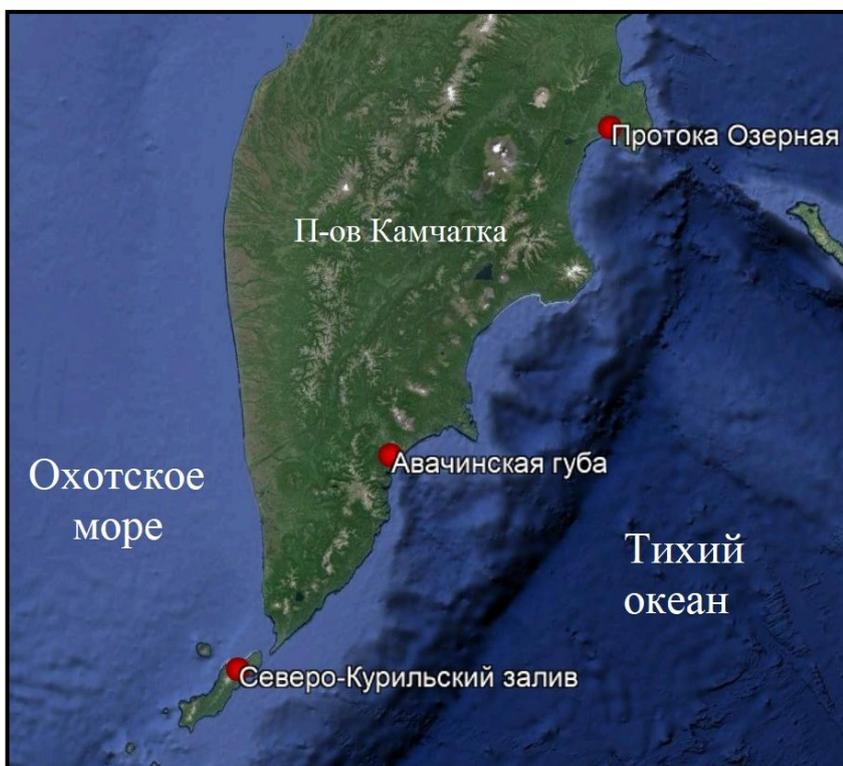


Рис. 1. Районы проведения исследований затопленных судов и мест их размещения

Fig. 1. The scheme of the surveyed areas in the locations of submerged ships

Так, в ходе исследований отобраны пробы поверхностных вод в 75 местах нахождения затонувших судов, из них в Авачинской губе в 2022 г. – в 23 местах, в 2023 г. – в 28 местах. В Северо-Курильском заливе в 2022 г. в девяти местах, в 2024 г. – в пяти местах, в протоке Озерной в 2024 г. пробы отбирались в 10 местах. Следует отметить, что в районе Северо-Курильского залива не у всех обследуемых судов проводился отбор проб воды в связи с их расположением на берегу в отдалении от уреза воды.

В сравнительном анализе содержания загрязняющих веществ в отобранных пробах морских поверхностных вод в качестве маркерных веществ, характеризующих негативное воздействие затонувших судов на водную среду, приняты взвешенные вещества, железо общее и нефтепродукты. Исследование водной среды на предмет увеличения мутности за счет повышенного содержания взвешенных веществ может быть обусловлено, в частности, возможностью наличия образованного метагидроксида железа (FeO/ОН), который в результате коррозии металла обнаруживается в нерастворимой форме в воде [Носова, 2021]. Повышенное содержание железа в воде может быть показателем коррозионной активности затонувших судов в водной среде. Загрязнение нефтепродуктами в районах обнаружения затонувших судов может быть обусловлено их наличием на судах в период их эксплуатации и разливом в результате разгерметизации емкостей.

Количественный анализ отобранных проб воды с района исследований на взвешенные вещества проводился гравиметрическим методом (методика испытаний ПНД Ф 14.1:2:4.254-09, издание 2017 г.), для анализа на содержание железа общего использовался фотометрический метод

исследования (методика испытаний ПНД Ф 14.1:2:3.2-95, издание 2017 г.), на содержание нефтепродуктов – флуориметрический (методика испытаний ПНД Ф 14.1:2:4.128-98, издание 2012 г.). Сравнительный анализ содержания загрязняющих веществ относительно предельно допустимых концентраций (ПДК) в отобранных пробах вод проводился в соответствии с приказом Минсельхоза России от 13.12.2016 г. № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении визуального обследования надводных частей затонувших судов выявлено, что в связи с многолетним нахождением брошенных судов в акватории Авачинской губы, протоки Озерной и Северо-Курильского залива, корпуса затонувших судов корродированы, имеются сквозные коррозии, что повлекло к деформации отдельных конструктивных элементов судов, у некоторых из них были удалены надстройки, выступающие над поверхностью воды, остальные части находятся в нижних горизонтах водной толщи. Затонувшие суда являются излюбленным местом обитания ларг и сивучей. При этом наличие острых металлических обломков, непрочность конструкций могут нанести им ощутимый вред.

Изучение подводных частей корпусов судов и обследование состояния морской флоры и фауны в месте нахождения затонувших судов с применением ТНПА показало, что корпуса всех судов в Авачинской губе и Северо-Курильского залива покрыты сообществами обрастаний. В Авачин-

ской губе на глубинах до 1 м отмечаются обрастания водорослями и мидиями, на глубинах 1–3 м – водорослями, мидиями и актиниями, в более глубоких горизонтах (3–10 м) были обнаружены покрытия водорослями, мидиями, актиниями и морскими звездами. Также отмечались признаки коррозии, и присутствовала сквозная коррозия, повлекшая деформацию отдельных конструкций судов (рис. 2).

Необходимо отметить, что в Северо-Курильском заливе у затонувших судов, находящихся в приливо-отливной зоне, на

корпусах не присутствовали обрастания (рис. 3). Возможно, это связано с морфологической адаптацией морской растительности и животных организмов к приливо-отливным условиям в Северо-Курильском заливе. В водах протоки Озерной суда, вне зависимости от глубины, покрыты только водорослями (рис. 4).

Внутри затонувших судов и на дне в местах их расположения обнаружены отходы производства и потребления, такие как тросы, тенты, составные части корпусов судов и различный металлолом (рис. 2–4).

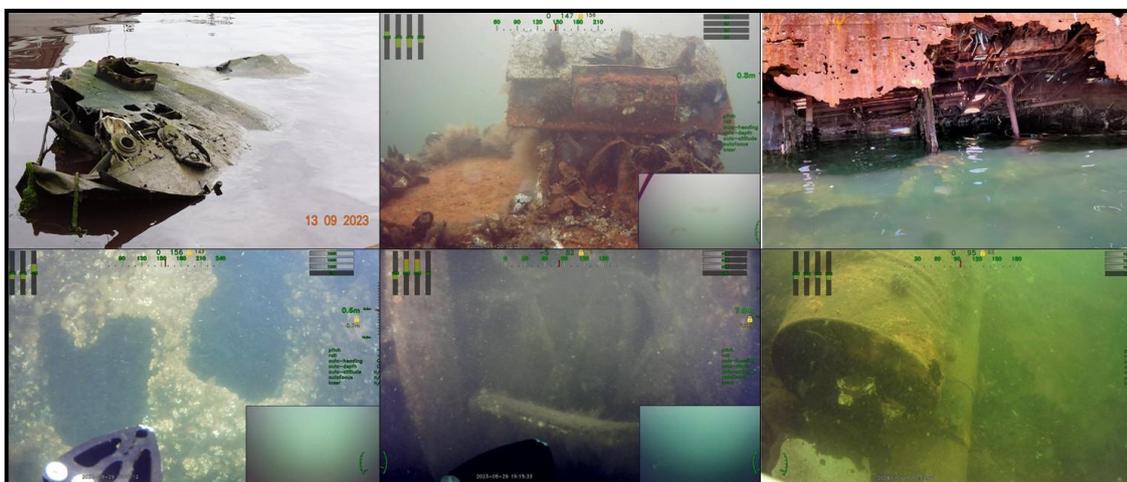


Рис. 2. Обследованные затопленные суда в Авачинской губе: надводная и подводная части

Fig. 2. Surveyed submerged vessels in the Avacha Bay: surface and underwater parts

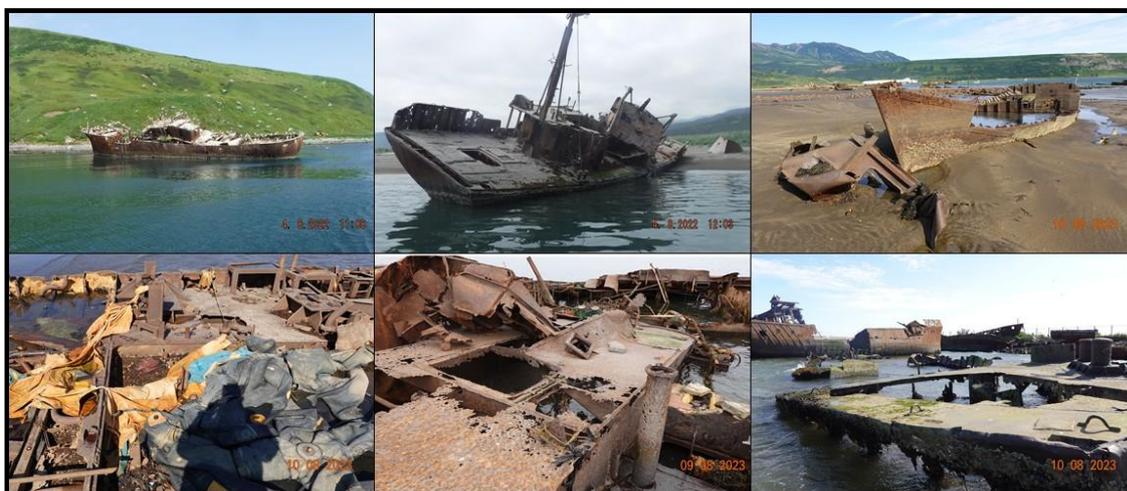


Рис. 3. Обследованные затопленные суда в Северо-Курильском заливе

Fig. 3. Surveyed submerged vessels in the North Kuril Bay

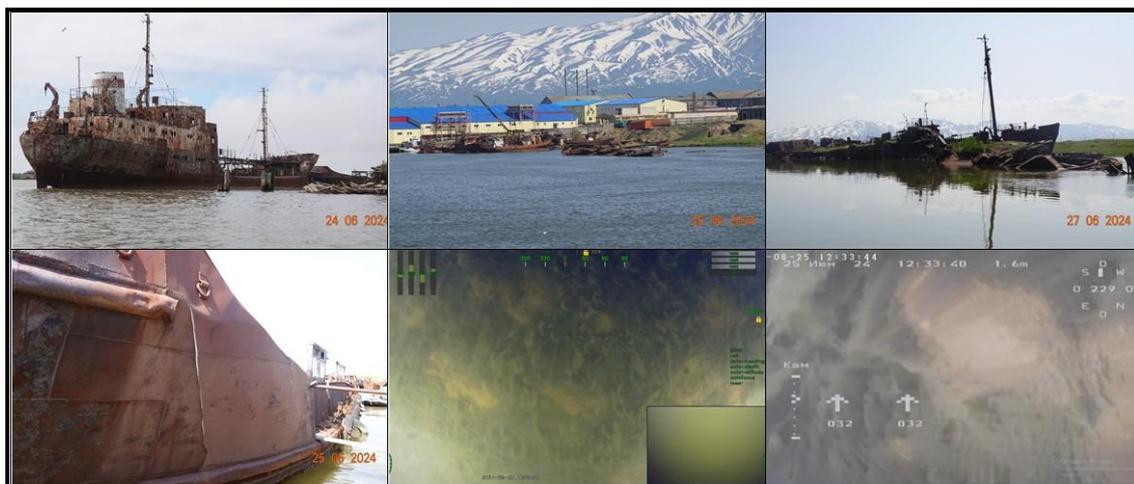


Рис. 4. Обследованные затопленные суда в протоке Озерной: надводная и подводная части

Fig. 4. Surveyed submerged vessels in the Ozernaya Bayou: surface and underwater parts

Отмечается, что биологический фактор (обрастание подводной части конструкции различными морскими растительными и животными организмами: мшанками, баянусами, диатомеями, кораллами) значительно ускоряет коррозию металлов в морской воде, вызывая разрушение защитных покрытий (что наблюдается в присутствии баянусов), неравномерную аэрацию и щелевую коррозию. Кроме того, некоторые организмы (например, диатомеи) в результате фотосинтеза выделяют кислород, что ускоряет коррозию [Жук, 2006].

Однако в ряде случаев слой живых организмов может тормозить коррозионный процесс. Обрастатели и микрофлора, частично изолируя металл от воды, затрудняют доступ кислорода к отдельным участкам. При равномерном сплошном обрастании углеродистая сталь корродирует медленнее, чем необросшая. Защитное действие равномерного слоя аэробных бактерий проявляется в снижении концентрации растворенного кислорода и в выделении известковых пленок, что способствует некоторому уменьшению скорости коррозии [Алекин, Ляхин, 1984].

Так, обрастание стали мидиями снижает скорость коррозии, что обусловлено значительным потреблением мидиями кислорода и снижением его концентрации в морской воде у поверхности корродирующего металла [Жук, 2006]. Наиболее активно процесс атмосферной коррозии происходит в морской воде, насыщенной растворенными солями, особенно содержащими хлорид-ионы. Содержание солей в такой морской воде составляет 4% [Жук, 2006], что оказывает достаточно агрессивное воздействие на затопленные суда.

Влияние металлических конструкций затопленных судов на морские воды Авачинской губы по маркерным показателям представлены в таблице 1. По ее данным, содержание взвешенных веществ находится в пределах нормы. В результатах исследования состояния морских вод Авачинской губы в 2022–2023 гг. отмечалось превышение предельных значений по содержанию общего железа в 1,7 раза в 2022 г. и в 1,4 раза в 2023 г. Превышение показателей по нефтепродуктам зафиксировано только в 2022 г. по максимальным значениям в 1,26 раза. Полученные значения

позволяют сделать предположение о негативном влиянии металлических материалов корпусов затопленных судов на состояние морских вод в результате коррозионной активности и поступления нефтесодержащих соединений. Как было показано ранее, тяжелые металлы и нефтепродукты способны накапливаться в донных отложениях и сидячих бентосных организмах: фильтраторах и водорослях [Касперович, 2011а, б; Касперович и др., 2016].

В водах Северо-Курильского пролива оценку воздействия производили как в поверхностных, так и придонных горизонтах. Сведения о полученных количественных показателях представлены в таблице 2. Согласно полученным химическим анализам выявлено, что загрязнения по количеству взвешенных веществ не отмечается. Однако по содержанию железа общего в исследованном районе замечено превышение значений ПДК в поверхностном слое в 2,3 раза в 2022 г. и в 1,64 раза в 2023 г.

Коррозионный процесс идет с кислородной деполяризацией, т. к. верхний слой морской воды насыщен кислородом, а перемешивание морской воды при волнении моря ускоряет коррозию неподвижных металлических сооружений [Кушнаренко и др., 2011].

В морских водах Северо-Курильского залива нами отмечено превышение железа общего в 2,3 раза в 2022 г. и в 1,68 раза в 2023 г. Известно, что в глубоководных зонах морской среды нередко отмечается наличие вытесняющих кислородных газов, в частности сероводорода, метана и т. д. Появлению сероводорода способствуют сульфатредуцирующие микроорганизмы. В созданных анаэробных условиях они образуют биопленки с выделением данного газа, а он, в свою очередь, усиливает коррозионную деформацию металлической поверхности. Поэтому в таких зонах

можно наблюдать повышенное воздействие коррозии металла от затонувших судов на водную среду.

Загрязнение нефтепродуктами в водах Северо-Курильского залива было отмечено только в 2022 г., по максимальным значениям: на поверхности в 1,3 раза, на глубине 1,5 м в 1,52 раза. Полученные значения указывают на наличие влияния затонувших судов на качество морских вод исследуемого района.

О воздействии затопленных судов на поверхностные природные воды свидетельствуют результаты исследований, проведенные в 2024 г. в протоке Озерной (см. табл. 3). По нашим данным, представленным в таблице 3, выявлено превышение нормативных значений ПДК по взвешенным веществам – в 1,5 раза (что, возможно, обусловлено особенностью гидрологического режима реки в результате повышенного содержания взвешенных наносов), и по железу общему – в 12,6 раза. Мы полагаем, что это характерно для хорошо аэрированной водной среды, в которой коррозионная активность будет проявляться наиболее интенсивно. Загрязнение нефтепродуктами в исследуемой воде не зафиксировано.

Вариация значений по содержанию общего железа в изучаемых водах (Авачинская губа, Северо-Курильский залив, протока Озерная) различна, что может зависеть от ряда факторов:

- расстояния от поверхности воды до дна в месте обнаружения затопленного судна;
- наличия сероводорода в природных частях водной среды, образованию которого способствует деятельность ряда микроорганизмов;
- насыщенности воды кислородом, поскольку эффективное поступление кислорода также ускоряет процесс коррозии [Носова, 2021].

Таблица 1. Анализ содержания загрязняющих веществ в Авачинской губе в местах нахождения затонувших судов в соответствии с ПДК в водах водных объектов рыбохозяйственного значения, установленных Приказом № 552

Table 1. Analysis of the content of pollutants in the Avacha Bay at the locations of sunken ships in accordance with the MAC in the waters of water bodies of fishery importance, established by Order № 552

Год	Количество отобранных проб в местах расположения затонувших судов	Наименование загрязняющих веществ и показателей	Ед. измерения	Диапазон значений показателей и концентраций в пробе	Среднее значение показателей и концентраций	ПДК, установленные Приказом Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552, для морских вод	Кратность превышения (среднее)
2022	23	Взвешенные вещества	мг/дм ³	2,3–149	69	10	6,9
		Железо общее	мг/дм ³	Менее 0,05–0,196	0,085	0,05	1,7
		Нефтепродукты	мг/дм ³	0,012–0,063	0,032	0,05	0,64
2023	28	Взвешенные вещества	мг/дм ³	1,2–9,5	4,39	10	0,44
		Железо общее	мг/дм ³	Менее 0,05–0,165	0,07	0,05	1,4
		Нефтепродукты	мг/дм ³	0,011–0,13	0,05	0,05	1

Таблица 2. Анализ содержания загрязняющих веществ в Северо-Курильского заливе в местах нахождения затонувших судов в соответствии с ПДК в водах водных объектов рыбохозяйственного значения, установленных Приказом № 552

Table 2. Analysis of the content of pollutants in the North Kuril Bay at the locations of sunken ships in accordance with the MAC in the waters of water bodies of fishery importance, established by Order № 552

Год	Количество отобранных проб в местах расположения затонувших судов	Наименование загрязняющих веществ и показателей	Ед. измерения	Диапазон значений показателей и концентраций в пробе	Среднее значение показателей и концентраций	ПДК, установленные Приказом Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552, для морских вод	Кратность превышения (среднее)
2022	9	Взвешенные вещества	мг/дм ³	1,9–7,7 (поверхностный слой)	4,2	10	0,42
				2,06–7,3 (придонный слой)	4,34		0,43
		Железо общее	мг/дм ³	0,052–0,177 (поверхностный слой)	0,115	0,05	2,3
				0,054–0,171 (придонный слой)	0,115		2,3
		Нефтепродукты	мг/дм ³	0,009–0,065 (поверхностный слой)	0,027	0,05	0,54
				0,012–0,076 (придонный слой)	0,027		0,54

Окончание табл. 2

The end of the Table 2

Год	Количество отобранных проб в местах расположения затонувших судов	Наименование загрязняющих веществ и показателей	Ед. измерения	Диапазон значений показателей и концентраций в пробе	Среднее значение показателей и концентраций	ПДК, установленные Приказом Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552, для морских вод	Кратность превышения (среднее)
2023	5	Взвешенные вещества	мг/дм ³	4,8–8,1 (поверхностный слой)	6,98	10	0,69
				5,8–9,0 (придонный слой)	7,4		0,74
		Железо общее	мг/дм ³	0,052–0,139 (поверхностный слой)	0,082	0,05	1,64
				0,053–0,115 (придонный слой)	0,084		1,68
		Нефтепродукты	мг/дм ³	0,009–0,023 (поверхностный слой)	0,015	0,05	0,3
				0,012–0,025 (придонный слой)	0,017		0,34

Таблица 3. Анализ содержания загрязняющих веществ в протоке Озерной в местах нахождения затонувших судов в соответствии с ПДК в водах водных объектов рыбохозяйственного значения, установленных Приказом № 552

Table 3. Analysis of the content of pollutants in Ozernaya Bayou at the locations of sunken ships in accordance with the MAC in the waters of water bodies of fishery importance, established by Order № 552

Год	Количество отобранных проб в местах расположения затонувших судов	Наименование загрязняющих веществ и показателей	Ед. измерения	Диапазон значений показателей и концентраций в пробе	Среднее значение показателей и концентраций	ПДК, установленные Приказом Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552, для морских вод	Кратность превышения (среднее)
2024	10	Взвешенные вещества	мг/дм ³	12,0–20,0	15,1	10	1,5
		Железо общее	мг/дм ³	0,40–0,90	0,63	0,05	12,6
		Нефтепродукты	мг/дм ³	Менее 0,005–0,010	0,0063	0,05	0,126

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований выведенных из эксплуатации полузатопленных и затопленных судов позволяют сделать вывод об их негативном влиянии

на морские воды прибрежной Камчатки, в том числе Авачинской губы и Северных Курил, поскольку:

1. Корпуса полузатопленных и затопленных судов, расположенные в акватории прибрежной Камчатки и Северных Курил,

корродированы, имеют сквозную коррозию и разрушения под влиянием многолетней коррозии;

2. На дне в местах расположения полузатопленных и затопленных судов имеется металлолом и отходы производства и потребления;

3. На многих полузатопленных и затопленных судах, в машинных отделениях, остались узлы и агрегаты, в которых могут содержаться остатки топлива, моторных и смазочных масел, а также льяльные воды, хладагенты судовых холодильных установок, моющие средства, остатки рыбопродукции и прочих грузов, потерявших потребительские свойства;

4. Корпуса судов покрыты сообществами обрастания. Установлено, что на судах в Авачинской губе на глубинах до 1 м отмечаются обрастания водорослями и мидиями, на глубинах 1–3 м водорослями, мидиями и актиниями, в более глубоких горизонтах обнаружены покрытия водорослями, мидиями, актиниями и морскими звездами. В протоке Озерной корпуса судов покрыты только водорослями;

5. Полузатопленные и затопленные суда в Авачинской губе находятся в районе обитания сивучей, включенных в Красные книги Российской Федерации и Камчатского края, а также других морских млекопитающих, используются ими как места для отдыха и в связи с износом конструкций, наличием острых краев, остатков сетей и тросов представляют опасность для животных;

6. В ходе сравнительного анализа содержания химических веществ в пробах вод, отобранных возле 75 затонувших судов в Авачинской губе, Северо-Курильском заливе и в протоке Озерной, зафиксированы превышения ПДК, установленные для водных объектов рыбохозяйственного значения по взвешенным веществам, железу общему и нефтепродуктам.

ЛИТЕРАТУРА

- Алекин О.А., Ляхин Ю.И. 1984. Химия океана. Ленинград: Гидрометеиздат. 344 с.
- Борисов В.М., Осетрова Н.В., Пономаренко В.П. и др. 2001. Влияние разработки морских месторождений нефти и газа на биоресурсы Баренцева моря. Методические рекомендации по оценке ущерба рыбному хозяйству. Москва: Экономика и информатика. 272 с.
- Гурвич Л.М., Шерстнев Н.М. 1994. Многофункциональные ПАВ в технологических операциях нефтедобычи. Москва: ВНИИОЭНГ. 268 с.
- Дуленин А.А., Кудревский О.А. 2019. Использование легкого телеуправляемого необитаемого подводного аппарата для морских прибрежных гидробиологических исследований. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. № 48. С. 6–17.
- Ермолаева Н.И., Двуреченская С.Я. 2014. Влияние повышенной антропогенной нагрузки на структурные изменения сообществ зоопланктона новосибирского водохранилища. *Материалы V Всероссийской конференции по водной экотоксикологии, посвященной памяти Б.А. Флерова «Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы»*. Том 1. Ярославль: Филигрань. С. 66–70.
- Жук Н.П. 2006. Курс теории коррозии и защиты металлов Учебное пособие для вузов. Москва: ООО ТИД «Альянс». 472 с.
- Касперович Е.В. 2011а. Техногенное влияние морских транспортных средств на состояние экосистем прикамчатских вод. *Диссертация ... канд. биол. наук*. Петропавловск-Камчатский. 155 с.
- Касперович Е.В. 2011б. Техногенное влияние морских транспортных средств на

- состояние экосистем прикамчатских вод: Автореферат дис. ... канд. биол. наук. Петропавловск-Камчатский. 25 с.
- Касперович Е.В., Швецов В.А., Петренко О.Е. и др. 2016. Корреляционные зависимости содержания загрязняющих веществ в донных отложениях на примере Авачинской губы. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. № 36. С. 63–73.
- Касперович Е.В., Смывалов А.А., Бочкарев Н.Ю. и др. 2024. Практика применения телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов при обследовании затопленных судов в Авачинской губе и Северо-Курильском заливе. *Чистый воздух: официальное издание Росприроднадзора*. № 7. С.14–19.
- Кушнаренко В.М., Репях В.С., Чирков Е.Ю. и др. 2011. Дефекты и повреждения деталей и конструкций. *Монография*. Оренбург: Оренбургский государственный университет. 402 с.
- Метелев В.В., Канаев А.И., Дзасохов Н.Г. 1971. Водная токсикология. Москва: Колос. 247 с.
- Михайлова Л.В. 1991. Действие водорастворимой фракции Усть-Балыкской нефти на ранний онтогенез стерляди *Acipenser ruthenus*. *Гидробиологический журнал*. Т. 27. № 3. С. 77–86.
- Носова Е.И. 2021. Коррозия предметов из железа и железных сплавов в морской среде. *Археология евразийских степей*. № 6. С. 308–314.
- Очеретяна С.О. 2017. Видовой состав и структура альгосообществ «зеленых приливов» в Авачинской губе и устойчивость зеленых водорослей-макрофитов к неблагоприятному воздействию. *Автореферат дис. ... канд. биол. наук*. Петропавловск-Камчатский. 24 с.
- Очеретяна С.О., Ключкова Н.Г., Ключкова Т.А. 2015. Сезонный состав «зеленых приливов» в Авачинской губе и влияние антропогенного загрязнения на физиологию и рост некоторых зеленых водорослей. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. № 33. С. 30–36.
- Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 02.06.2023 г. № 200 «Об утверждении перечня затонувшего имущества, удаление которого является обязательным в соответствии с пунктами 2 и 3 статьи 109 Кодекса торгового мореплавания Российской Федерации».
- Санамян Н.П., Коробок А.В., Санамян К.Э. 2023. Качественная оценка последствий влияния вредоносного цветения водорослей осенью 2020 года у побережья Юго-Восточной Камчатки (Северо-Западная Пацифика) на мелководные бентосные сообщества. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. № 63. С. 22–44.
- Список затонувших судов и иных объектов, подлежащих удалению из акватории Авачинской губы. URL: <https://kamgov.ru/korabli> (дата обращения: 12.12.2023 г.).
- Boardman G.D., Starbuck S.M., Hudgins D.B., Li X., Kuhn D.D. 2004. Toxicity of ammonia to three marine fish and three marine invertebrates. *Environmental Toxicology*. Vol. 19(2). P. 134–142.
- Carls M.G., Marty G.D., Hose J.E. 2002. Synthesis of the toxicological impacts of the Exxon Valdez oil spill on Pacific herring (*Clupea pallasii*) in Prince William Sound, Alaska, U.S.A. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. Vol. 59. P. 153–172.

REFERENCES

- Alekin O.A., Lyakhin Yu.I. 1984. Ocean chemistry. Leningrad: Hydrometeoizdat Publisher. 344 p. (in Russian).

- Borisov V.M., Osetrova N.V., Ponomarenko V.P. et al. 2001. The impact of the development of offshore oil and gas fields on the bioresources of the Barents Sea: Methodological recommendations for assessing damage to fisheries. Moscow: Economics and Informatics Publisher. 272 p. (in Russian).
- Gurvich L.M., Sherstnev N.M. 1994. Multifunctional surfactants in technological operations of oil production. Moscow: VNIIOENG Publ. 268 p. (in Russian).
- Dulenin A.A., Kudrevsky O.A. 2019. The use of lightweight remote operated vehicle for marine coastal hydrobiological investigations. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta (Bulletin of Kamchatka State Technical University)*. № 48. P. 6–17 (in Russian).
- Ermolaeva N.I., Dvurechenskaya S.Ya. 2014. The influence of increased anthropogenic load on structural changes in zooplankton communities of the Novosibirsk reservoir. *Proceedings of the V Russian conference on aquatic ecotoxicology "Anthropogenic influence on aquatic organisms and ecosystems"*. Vol. 1. Yaroslavl: Filigree Publ. P. 66–70 (in Russian).
- Zhuk N.P. 2006. Course of the theory of corrosion and protection of metals: a study guide for universities. Moscow: LLC TID "Alliance" Publ. 472 p. (in Russian).
- Kasperovich E.V. 2011a. Technogenic influence of marine vehicles on the state of ecosystems of the Kamchatka waters. *Candidacy dissertation for biological sciences*. Petropavlovsk-Kamchatsky. 155 p. (in Russian).
- Kasperovich E.V. 2011b. Technogenic influence of marine vehicles on the state of ecosystems of the Kamchatka waters. *Abstract of the candidacy dissertation for biological sciences*. Petropavlovsk-Kamchatsky. 25 p. (in Russian).
- Kasperovich E.V., Shvetzov V.A., Petrenko O.E. et al. 2016. Correlation dependences of the pollutant content in bottom deposits on the example of Guba Avachinskaya. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta (Bulletin of Kamchatka State Technical University)*. № 36. P. 63–73 (in Russian).
- Kasperovich E.V., Smyvalov A.A., Bochkarev N.Yu. et al. 2024. The practice of using remote-controlled uninhabited underwater vehicles in the examination of submerged vessels in the Avacha Bay and the North Kuril Bay. *Chistyj vozduh (Clean Air)*. № 7. P. 14–19 (in Russian).
- Kushnarenko V.M., Repyakh V.S., Chirkov E.Yu. et al. 2011. Defects and damages of parts and structures. *Monograph*. Orenburg: Orenburg State University Publ. 402 p. (in Russian).
- Metelev V.V., Kanaev A.I., Dzasokhov N.G. 1971. *Aquatic Toxicology*. Moscow: Kolos Publ. 247 p. (in Russian).
- Mikhailova L.V. 1991. The effect of the water-soluble fraction of Ust-Balyk oil on the early ontogenesis of the sterlet *Acipenser ruthenus*. *Gidrobiologicheskij zhurnal (Hydrobiological Journal)*. Vol. 27. № 3. P. 77–86 (in Russian).
- Nosova E.I. 2021. Corrosion between iron ore and iron powers in the marine environment. *Arheologiya evrazijskih stepej (Archaeology of the Eurasian Steppes)*. № 6. P. 308–314 (in Russian).
- Ocheretyana S.O. 2017. Species composition and structure of algaesociety of green "tides" in the Avacha Bay and resistance of green macrophyte algae to adverse effects. *Abstract of the candidacy dissertation for biological sciences*. Petropavlovsk-Kamchatsky. 24 p. (in Russian).
- Ocheretyana S.O., Klochkova N.G., Klochkova T.A. 2015. Seasonal species composition of "green tide"-forming algae from

Avacha Bay and effect of anthropogenic pollution on physiology and growth of some green algae. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta (Bulletin of Kamchatka State Technical University)*. № 33. P. 30–36 (in Russian).

Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation № 200 dated 02.06.2023 “On approval of the list of sunken property, the removal of which is mandatory in accordance with paragraphs 2 and 3 of Article 109 of the Merchant Shipping Code of the Russian Federation” (in Russian).

Sanamyan N.P., Korobok A.V., Sanamyan K.E. 2023. Qualitative assessment of algae harmful bloom impact in autumn 2020 off the coast of South-Eastern Kamchatka (North-West Pacific) on shallow-water benthic communities. *Vestnik Kamchats-*

kogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta (Bulletin of Kamchatka State Technical University). № 63. P. 22–44 (in Russian).

The list of sunken ships and other objects to be removed from the waters of the Avacha Bay. URL: <https://kamgov.ru/korabli> (accessed: 12.12.2023) (in Russian).

Boardman G.D., Starbuck S.M., Hudgins D.B., Li X., Kuhn D.D. 2004. Toxicity of ammonia to three marine fish and three marine invertebrates. *Environmental Toxicology*. Vol. 19(2). P. 134–142.

Carls M.G., Marty G.D., Hose J.E. 2002. Synthesis of the toxicological impacts of the Exxon Valdez oil spill on Pacific herring (*Clupea pallasii*) in Prince William Sound, Alaska, U.S.A. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. Vol. 59. P. 153–172.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Касперович Екатерина Владимировна – Камчатская дирекция по техническому обеспечению надзора на море; 683031, Россия, Петропавловск-Камчатский; кандидат биологических наук, директор; kasperovichev@mail.ru.

Kasperovich Ekaterina Vladimirovna – Kamchatka Directorate for Technical Supply of Sea Supervision; 683031, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Candidate of Biological Sciences, Director; kasperovichev@mail.ru.

Бочкарев Никита Юрьевич – Камчатская дирекция по техническому обеспечению надзора на море; 683031, Россия, Петропавловск-Камчатский; ведущий инженер по охране окружающей среды (эколог); nikita_bochkarev_99@mail.ru.

Bochkarev Nikita Yuryevich – Kamchatka Directorate for Technical Supply of Sea Supervision; 683031, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Leading Environmental Engineer (Ecologist); nikita_bochkarev_99@mail.ru.

Радайкин Егор Алексеевич – Камчатский государственный технический университет; 683003, Россия, Петропавловск-Камчатский; студент магистратуры; egor140945@gmail.com.

Radaykin Egor Alexeevich – Kamchatka State Technical University; 683003, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Master Degree Student; egor140945@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 15.10.2024; одобрена после рецензирования 15.12.2024; статья принята к публикации 20.03.2025.

The article was submitted 15.10.2024; approved after reviewing 15.12.2024; accepted for publication 20.03.2025.

Для цитирования: Касперович Е.В., Бочкарев Н.Ю., Радайкин Е.А. 2025. Техногенное влияние полузатопленных и затопленных судов на морские прибрежные воды Камчатки (в том числе Авачинской губы) и Северных Курил. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. Вып. 71. С. 72–86. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2025-71-72-86>.

For citation: Kasperovich E.V., Bochkarev N.Yu., Radaikin E.A. 2025. Technogenic impact of decommissioned ships on the marine coastal waters of Kamchatka (including the Avacha Bay) and Northern Kurile islands. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta (Bulletin of Kamchatka State Technical University)*. Iss. 71. P. 72–86 (in Russian). <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2025-71-72-86>.

Научная статья

УДК [504.5:665.7](265.5)

DOI: 10.17217/2079-0333-2025-71-87-107

ЗАГРЯЗНЕНИЕ НЕФТЕПРОДУКТАМИ ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЙ АВАЧИНСКОЙ ГУБЫ (АВАЧИНСКИЙ ЗАЛИВ)

Мартыненко Д.О.^{1,2}, Позолотина Л.А.^{1,2}, Назарова М.А.², Климова А.В.^{1,3}

¹ Камчатский государственный технический университет, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35.

² Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, б-р Пийпа, 9.

³ Камчатский филиал Тихоокеанского института географии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Партизанская, 6.

Приведен ретроспективный анализ исследований экологического состояния Авачинской губы за период с 1999 по 2024 гг. на основе данных 114 публикаций из открытых источников и официальных ежегодных отчетов. Установлено, что многолетний мониторинг загрязнения бухты осуществляют преимущественно по химическому анализу воды на содержание нефтепродуктов, фенолов, тяжелых металлов, АПАВ (СПАВ), взвешенных и биогенных веществ (в 56,8% всех исследований). В остальных компонентах среды загрязнители учитывают редко и несистемно в рамках инициативных наблюдений, при этом в донных отложениях отслеживают только содержание нефтепродуктов и тяжелых металлов (в 15,9% публикаций), последние загрязнители определяют также в гидробионтах (в 27,3% публикаций). Как правило, в прибрежных экосистемах Авачинского залива это представители массовых видов водорослей-макрофитов, двустворчатых моллюсков и морских рыб. Установлено, что нефтепродукты вносят наибольший вклад в загрязнение акватории Авачинской губы, в последние несколько лет участились аварийные разливы и утечки этого загрязнителя. Существующая сеть государственного мониторинга экологического состояния бухты насчитывает 10 станций, при этом в северо-восточной ее части, у городского побережья Петропавловска-Камчатского, размещены всего 4. Эти станции удалены от береговой портовой инфраструктуры краевой столицы от 265 м до 1,6 км. За последние пять лет государственный экологический мониторинг выявил тенденцию к снижению среднегодового уровня растворенных нефтепродуктов в воде до 0,005 мг/л, в то же время максимально разовые значения их содержания могли существенно превышать установленные нормы и достигать 19 мг/л. Собственные исследования авторов по определению содержания нефтепродуктов в прибрежных районах северо-восточной части Авачинской губы за период с ноября 2022 г. по август 2024 г. выявили превышение установленных нормативов в 85% проб воды, и в целом их высокий среднегодовой уровень от 0,3 до 1,3 мг/л. Проведенный обзор данных из открытых источников и полученные результаты химического анализа позволяют констатировать наличие длительного и интенсивного воздействия нефтяного загрязнения прибрежных акваторий Авачинской губы. Поэтому при усилении роли Петропавловск-Камчатского порта в качестве опорного пункта Северного морского пути следует разработать меры по улучшению и модернизации наблюдений за экологическим состоянием бухты, особенно в береговой зоне для сохранения и восстановления морских прибрежных сообществ.

Ключевые слова: Авачинская губа, загрязнение, нефтепродукты, прибрежные экосистемы, экологический мониторинг, Юго-Восточная Камчатка.

Original article

OIL PRODUCTS POLLUTION OF THE AVACHA BAY COASTAL AREAS (AVACHINSKY GULF)

Martynenko D.O.^{1,2}, Pozolotina L.A.^{1,2}, Nazarova M.A.², Klimova A.V.^{1,3}¹ Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Klyuchevskaya Str. 35.² Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Piip Blvd 9.³ Kamchatka Branch of Pacific Geographical Institute FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Partyzanskaya Str. 6.

A retrospective analysis of studies of the ecological state of the Avacha Bay in the period from 1999 to 2024 based on data from 114 open-source publications and official annual reports is presented. It has been established that long-term pollution monitoring covers exclusively chemical analysis of water for the content of oil products, phenols, metals, anionic surfactants (surfactants), suspended and biogenic substances (in 56.8% of all studies). In other components of the environment, pollutants are rarely and unsystematically observed within the framework of initiative studies, while in bottom sediments only the content of oil products and solid metals is monitored (in 15.9% of publications), the latter pollutants are also determined in aquatic organisms (in 27.3% of publications). As a rule, in the coastal ecosystems of the Avacha Bay, these are representatives of mass species of marine macrophytes, bivalve mollusks and marine fish. It has been established that petroleum products make the greatest contribution to pollution of the Avacha Bay water area; in the last few years, there have been accidental spills and leaks of this pollutant. The existing network of state environmental reports includes 10 surveys, while in its north-eastern part, on the city coast of Petropavlovsk-Kamchatsky, only 4 have been registered. These stations are located from 265 m to 1.6 km from the coastal port regional province. Over the past five years, state environmental monitoring has revealed a decrease in the average annual level of dissolved petroleum products in water to 0.005 mg/l, while the maximum one-time values of their content may exceed the maximum established standards and requirements of 19 mg/l. The authors of the research on determining the content of oil products in the coastal regions of the north-eastern part of the Avacha Bay for the period from November 2022 to August 2024 revealed excesses of established standards in 85% of water samples and, in general, at a high average annual level of 0.3 to 1.3 mg/l. The conducted review of data from open sources and the obtained results of chemical analysis allows us to maintain the presence of a long-term and intense impact of oil pollution of the coastal waters of the Avacha Bay. Therefore, with the strengthening of the role of the Petropavlovsk-Kamchatsky port as a stronghold of the Northern Sea Route, measures should be developed to continue and gradually improve the ecological state of the bays, especially in the coastal zone, in order to preserve and restore marine coastal communities.

Key words: the Avacha Bay, pollution, oil products, coastal ecosystems, environmental monitoring, South-Eastern Kamchatka.

ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг загрязнения нефтепродуктами (НП) прибрежных районов является актуальной задачей для восстановления и сохранения морских экосистем. В ключевых городах-портах Российской

Федерации содержание этого загрязнителя в водной среде отслеживается посредством ведения государственного мониторинга за состоянием окружающей среды [Качество..., 2023]. Одним из таких городов является Петропавловск-Камчатский (Камчатский край), который расположен вдоль

северо-восточного побережья Авачинской губы (Авачинский залив). Кроме того, в прибрежных районах бухты размещено наибольшее количество производственных и сельскохозяйственных предприятий Авачинской агломерации, а также городского населения (164 тыс. человек) [Территориальный..., 2024].

На берегу Авачинской губы расположен главный порт региона, и в силу этого значительная часть северо-восточного побережья преобразована причальными сооружениями, в настоящее время насчитывается 69 терминалов, а грузооборот ежегодно превышает 2 млн тонн [Учимся..., 2024]. Здесь швартуются транспортные и промысловые суда, только в 2023 г. количество заходов/отходов судов составило 33 262 и уже в первом полугодии 2024 г. достигало 12 727. Всего на начало 2024 г. в Петропавловск-Камчатском порту зарегистрировано свыше 2 тыс. единиц маломерного флота, в акватории активно ведутся погрузо-разгрузочные и судоремонтные работы. Очевидно, что активное судоходство вкупе со сбросом сточных вод промышленных предприятий и жилых массивов, поверхностным стоком с урбанизированных территорий и износ портовой инфраструктуры приводят к негативному воздействию на прибрежную экосистему. В акватории бухты регулярно регистрируют нефтяную пленку на поверхности, часто у причальных сооружений отмечают разливы нефтепродуктов [Качество..., 2023; Доклад..., 2024].

В то же время Авачинская губа относится к высшей категории рыбохозяйственного водопользования, и в целом качество вод бухты соответствует II классу – «чистые» [Доклад..., 2024]. В летнее время здесь проходят пути анадромных миграций тихоокеанских лососей в реки Паратунку и Авачу, а также покатная миграция их

молоди, а в зимний период регулярно отмечают скопления сивучей у мыса Чавыча и на причальных сооружениях бухт Моховой и Петропавловской. По этой причине сохранение благоприятной экологической обстановки в этой части Авачинского залива является важной задачей. Поэтому целью настоящей работы являлось определение современного уровня загрязнения нефтепродуктами прибрежной акватории северо-восточного побережья Авачинской губы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Ретроспективный анализ литературы проводили при помощи научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU [<https://www.elibrary.ru/>] и базы данных научных статей ScienceDirect [<https://science-direct.com/>]. Поиск публикаций осуществляли по ключевым словам: «загрязнение / состояние / мониторинг / нефтепродукты и Авачинская губа» [«pollution» OR «monitoring» OR «oil» OR «Avacha Bay»]. Кроме того, к анализу привлекали результаты государственного экологического мониторинга, обнародованные на официальном сайте министерства природных ресурсов и экологии Камчатского края в сборниках «Доклад о состоянии окружающей среды в Камчатском крае» [<https://minprir.kamgov.ru/ohrana-okruzausej-sredy>] и на сайте Государственного океанологического института в ежегодниках «Качество морских вод по гидрохимическим показателям» [<http://www.oceanography.institute/index.php>]. После поиска публикаций по названию анализировали их аннотации и рефераты. Подходящие по тематике статьи отбирали для последующего подробного анализа. Всего для оценки экологического состояния Авачинской губы за период 1999–2024 гг. в настоящей

работе использовали данные из 114 научных публикаций, статистических сборников, отчетов и электронных источников. Библиографический список источников приведен на портале ResearchGate (https://www.researchgate.net/publication/388401045_REFERENCES_Spisok_istocnikov_literatury_po_ekologiceskim_issledovaniam_Avacinskoj_guby_Avacinskij_zaliv_ugovostocnaa_Kamcatka_1999-2024, DOI: 10.13140/RG.2.2.24033.83049). Экологическая ситуация в бухте в более ранний период детально представлена в монографии Н.Г. Клочковой и В.А. Березовской [Клочкова, Березовская, 2001], поэтому в настоящей работе анализ публикаций о загрязнении акватории до 1999 г. не приведен.

Собственные исследования состояния водной среды проводили у северо-восточного побережья Авачинской губы (рис. 1). При этом станции в бух. Сероглазке (ст. 11 и 12, рис. 1, *Б, Ж, К*), бух. Петропавловской (ст. 14, рис. 1, *Г, Л*) и у мыса Санникова (ст. 15, рис. 1, *Д, Л*) располагались непосредственно вблизи портовой инфраструктуры. Станция у подножия сопки Никольской (ст. 13, рис. 1, *В, Л*) – вблизи центрального городского пляжа и причальных сооружений «Океанрыбфлота», за фоновый принимали район бух. Завойко (ст. 16, рис. 1, *Е, Л*).

Отбор проб воды в прибрежной зоне проводили с октября 2022 г. по август 2024 г., исключая зимние месяцы, согласно ГОСТ 31861-2012 «Вода. Общие требования к отбору проб» (см. табл. 1). Определение концентрации нефтепродуктов (НП) выполняли, руководствуясь аттестованной методикой ПНД Ф 14.1:2:4.168-2000 «Методика (метод) измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах питьевых, природных и очищенных сточных водах методом ИК-спектрофотометрии

с применением концентратометров серии КН» на приборе «Концентратомер КН-3» (Сибэкоприбор, Россия). Пробоподготовку и анализ собранных материалов выполняли в Аналитическом центре Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

Статистическую обработку и визуализацию результатов выполняли в программе GraphPad Prism ver. 10.0.2. (GraphPad Software).

Обзор экологического состояния Авачинской губы

Негативное воздействие хозяйственной деятельности на состояние Авачинской бухты наблюдали уже в начале XX в. Так, в мае 1909 г. В.П. Савич – участник экспедиции Ф.П. Рябушинского – отметил загрязненность дна бухты Петропавловской: «Дно его оказалось... сильно загрязненным отбросами города и океанских судов...» [Савич, 1914]. Впоследствии антропогенная нагрузка на Авачинскую бухту с каждым годом росла – увеличивалось количество сбрасываемых неочищенных и недостаточно очищенных стоков. При этом долгое время официальный мониторинг экологического состояния Авачинской бухты не осуществлялся, регулярные наблюдения начались только с 1960 гг. [Кондратюк, Липовка, 1985]. Проблема загрязнения Авачинской губы оставалась актуальной и до начала настоящего столетия, поскольку в ходе этих наблюдений продолжали фиксировать высокий уровень загрязнения вод [Качество..., 2005, 2009, 2012, 2015, 2018, 2021, 2023].

В настоящее время мониторинг гидрохимических показателей Авачинской губы проводится специалистами ФГБУ «УГМС Камчатское» на девяти станциях и Управлением Роспотребнадзора (см. рис. 2, *А*) [Доклад..., 2023].



Рис. 1. Район исследований у северо-восточного побережья Авачинской губы: А – карта-схема расположения станций отбора проб воды, Б – Е – спутниковые снимки мест отбора проб, масштаб 400 м, Ж – Л – фотографии прибрежных районов с расположением станций. 1, 6–10 – станции государственного мониторинга, 11–16 – станции отбора проб воды

Fig. 1. The study area off the north-eastern coast of the Avacha Bay: А – map showing the location of water sampling stations, Б – Е – satellite images of sampling sites, scale 400 m, Ж – Л – photographs of coastal areas with the location of stations. 1, 6–10 – state monitoring stations, 11–16 – water sampling stations

Таблица 1. Места отбора проб воды у северо-восточного побережья Авачинской губы и их характеристика
Table 1. Water sampling sites off the north-eastern coast of the Avacha Bay and their characteristics

№ п/п	№ станции	Наименование станции	Координаты	Степень трансформации берега, %*	Вид трансформации	Месяцы отбора проб
1	11	бухта Сероглазка («ННК-Камчат-нефтепродукт»)	53°3'4.59"С/ 158°36'14.26"В	72,5	нефтебаза, зоны перекачки нефти, причальные сооружения	2022: октябрь;
2	12	бухта Сероглазка (морской рефрижераторный терминал)	53°2'35.81"С/ 158°36'57.83"В		причальные сооружения	2023: июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь;
3	13	сопка Никольская	53°1'25.99"С/ 158°38'29.49"В	53,8	центральная набережная, причальные сооружения	2024: апрель, июнь, июль, август
4	14	бухта Петропавловская	53°0'46.82"С/ 158°38'34.92"В	97,2	причальные сооружения	
5	15	мыс Санникова	52°59'0.20"С/ 158°39'39.27"В	50,7	причальные сооружения	
6	16	бухта Завойко	52°56'47.73"С/ 158°40'13.43"В	<5	причальные сооружения	

* Степень трансформации указана относительно протяженности конкретной бухты

* The degree of transformation is indicated relative to the length of a particular bay

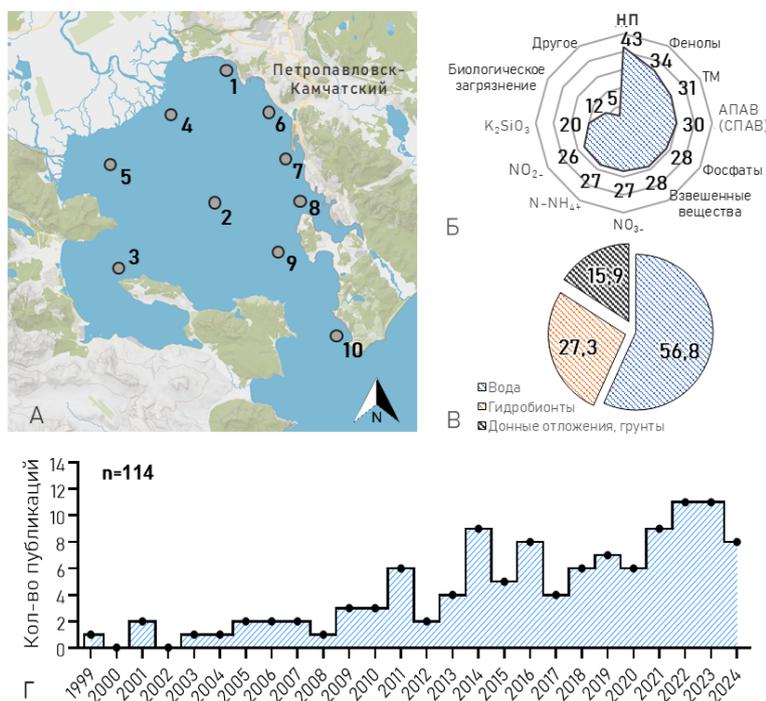


Рис. 2. Мониторинговые исследования экологического состояния Авачинской губы: А – расположение станции мониторинга в бухте, Б – основные анализируемые загрязнители бухты и частота их упоминаний (шт.) в открытых источниках литературы за период 1999–2024 гг., В – основные исследуемые компоненты экосистемы бухты и доля их упоминаний (%) в открытых источниках литературы за период 1999–2024 гг., Г – динамика опубликования результатов экологических исследований бухты за период 1999–2024 гг.

Fig. 2. Monitoring studies of the ecological state of the Avacha Bay: A – location of the monitoring station in the bay, Б – the main analyzed pollutants of the bay and the frequency of their mentions (pcs.) in open sources of publications during 1999–2024, В – the main studied components of the bay ecosystem and the proportion of their mentions (%) in open sources of publications during 1999–2024, Г – publication dynamics of results of environmental studies of the bay during 1999–2024

Станции мониторинга расположены у прибрежной зоны пос. Авача (1), в центре бухты (2), на входе в бух. Крашенинникова у мыса Поворотного (3), между устьями рек Авачи и Паратунки (4), в устье реки Паратунки у мыса Казак (5), напротив городского пляжа (6), у мыса Сигнального (7), в бух. Раковой (8) и у входа в горло губы (9). Кроме того, с 2013 г. специалистами Камчатского филиала ВНИРО ведется оценка современного эколого-рыбохозяйственного состояния бухты и изучение условий среды обитания гидробионтов [Лепская и др., 2014]. При этом изначально комплексный экологический мониторинг специалистами Камчатского филиала ВНИРО проводился на десяти станциях, аналогичных тем, что и у «УГМС Камчатское», кроме одной – в бухте Шлюпочной, возле скал Три Брата (10). Однако в 2022 г. сеть станций комплексного мониторинга сократилась до семи (рис. 2, А), а в 2023 г. – до трех, и в настоящее время оценка эколого-рыбохозяйственного состояния бухты осуществляется только в устьях рек Паратунки и Авачи, в центре бухты и в бух. Шлюпочной (станции 2, 4 и 10) [Доклад..., 2023, 2024].

Государственный мониторинг экологического состояния Авачинской губы по видам загрязнителей неравномерен (рис. 2, Б), чаще всего рассматривается загрязнение воды НП, фенолами, АПАВ (СПАВ), фосфатами, нитритами, нитратами, аммонийным азотом и силикатами. При этом в рамках государственного экологического мониторинга бухты в водной среде, донных отложениях и гидробионтах не определяются ХОП, ПХБ и тяжелые металлы (Cd, Pb, Al, Cr, Ni, Cu, Zn, Hg). В инициативных научно-исследовательских работах чаще оценивают загрязнение бухты тяжелыми металлами, а также отмечают различные негативные природные явления «красные» и «зеленые» приливы), реже – нитратный азот, аммоний-

ный азот, силикаты, нитритный азот, АПАВ (СПАВ) и фосфаты (рис. 2, Б).

Практически без внимания остается определение содержания загрязняющих веществ в депонирующих средах – в донных отложениях и гидробионтах, которые могут дать объективную оценку уровня загрязнения акватории Авачинской губы (рис. 2, Б). При этом в разнообразных биологических объектах (макроводоросли, двустворчатые моллюски и морские рыбы), как правило, устанавливают соответствие санитарно-гигиеническим требованиям только по тяжелым металлам [Федорченко и др., 2011; Очеретяна и др., 2014; Клочкова и др., 2016; Токранов и др., 2018; Позолотина и др., 2019; Рудев, Климова, 2022; Климова и др., 2023]. Отдельным направлением изучения экологического состояния бухты является микробная индикация [Димитриева и др., 2001; Бузолева и др., 2006; Сергеевко, Устименко, 2016; Рогатых и др., 2024]. Особое внимание уделяется наблюдениям за вредоносным цветением водорослей в Авачинской бухте и других районах Авачинского залива после событий 2020 г. [Войтовская, Орлова, 2023; Orlova et al., 2022].

Также неравномерны в плане охвата источники поступления загрязнителей в акваторию места проведения государственного экологического мониторинга – не затрагиваются районы с портовой инфраструктурой и важные для морской акватории прибрежные экосистемы (рис. 1, А). Все станции мониторинговых работ как у «УГМС Камчатское», так и у Камчатского филиала ВНИРО, расположены вдоль городского побережья, достаточно удалены от береговой линии: от 265 м (ст. 8) до 1,6 км (ст. 7) [Лепская и др., 2014]. Например, ближайшее расстояние от станции мониторинга (ст. 6) до популярной среди населения рекреационной зоны городской набережной

Петропавловска-Камчатского составляет 1,5 км (см. рис. 2, А). В то же время имеются исследования потенциальных источников загрязнения (ТМ и НП) и путей их поступления посредством речного и терригенного стока в акваторию бухты [Чалов и др., 2022; Мартыненко и др., 2024].

Согласно данным из открытых источников, с каждым годом научный интерес к экологическому состоянию бухты увеличивается (см. рис. 2, Г). Только за последние 25 лет было опубликовано 114 научных публикаций и официальных отчетных документов, касающихся загрязнения Авачинской губы и ее антропогенной трансформации. Основной акцент при этом в работах уделяется изучению состояния водной среды (56,8% от общего числа публикаций), а среди всех загрязнителей акваторий – нефтепродуктам (см. рис. 2, Б, В).

Аварийные разливы в Авачинской бухте в период с 1980 по 2019 гг. регистрировали нерегулярно (табл. 2). Однако за последние несколько лет случаи утечек и разливов нефти участились. Так, в июне 2020 г. случился разлив НП в бух. Крашенинникова, в августе 2021 г. – утечка нефти в бух. Сероглазке, а в мае 2022 г. – разлив НП в районе центральной набережной, начиная от пирса Океанрыбфлота и заканчивая отделением ГИМС. В последнем случае,

по информации Дальневосточного межрегионального Управления Росприроднадзора, в пробах воды в день разлива были выявлены превышения ПДК в 244 и 380 раз (12,2 и 19 мг/л соответственно) [Качество..., 2023]. Безусловно, все вышеперечисленное обуславливает повышенное внимание к этому загрязнителю при проведении государственного экологического мониторинга.

Анализ имеющихся данных по содержанию НП в водах Авачинской губы за период 1970 по 2023 гг. представлен на рисунке 3. Поскольку бухта относится к водоемам рыбохозяйственного значения высшей категории (акт Северо-Восточного ТУ № 5 от 15.10.2014 г.), то предельно допустимая концентрация НП здесь не должна превышать 0,05 мг/л. Следует отметить, что максимально разовые значения за весь период наблюдений установлены в 1990 г. (82 ПДК) и 2022 г. (380 ПДК). При этом первый случай связан с длительным поступлением керосина в северо-восточную часть бухты из безымянного ручья в результате утечек из трубопровода в районе 20-го километра Петропавловско-Елизовской автодороги [Клочкова, Березовская, 2001]. Вторым случаем, в мае 2022 г., связан с обозначенным выше разливом НП вдоль побережья центральной набережной Петропавловска-Камчатского (табл. 2).

Таблица 2. Сведения об аварийных разливах нефтепродуктов в Авачинской губе за период 1984–2022 гг.

Table 2. Information of accidental oil spills in the Avacha Bay during 1984–2022

№ п/п	Год	Район	Источник разлива	Вид НП и количество	Ссылка
1	1984	бухта Петропавловская	танкер «Память Ленина»	ДТ	[Клочкова, Березовская, 2001]
2	1986	бухта Петропавловская	бункеровщик	М	[Клочкова, Березовская, 2001]
3	1988	океаническая база «XXVII съезд КПСС» и территория СРЗ плавбазы «Днепрострой»	не установлен	НП: 20 т	[Клочкова, Березовская, 2001]
4	1990	северо-восточная часть бухты	утечка из трубопровода Петропавловско-Елизовской автодороги	К	[Клочкова, Березовская, 2001]

Окончание табл. 2

The end of the Table 2

№ п/п	Год	Район	Источник разлива	Вид НП и количество	Ссылка
5	1993	бухта Шлюпочная	танкер «Северный полюс»	НП: 100 т	[Клочкова, Березовская, 2001]
6	2005	бухта Раковая	возгорание на траулере «26 съезд КПСС»	М: 5 т	[На Камчатке..., 2005]
7	2007	горло бухты	контейнеровоз «Капитан Артюх»	НП	[Коровин, 2014]
8	2008	бухта Раковая	при сливе мазута с танкера в резервуары ТЭЦ-1	М	[Берингово..., 2010]
9	2008	бухта Раковая	танкер «Игрим»	М: 0,8 т	[На Камчатке..., 2008]
10	2010	бухта Крашенинникова	танкер «Бухта Славянка»	М: 40	[Авачинская..., 2010]
11	2011	мыс Маячный	сухогруз «AI QI SHUN»	НП	[Коровин, 2014]
12	2015	бухта Раковая	утечка из емкости в границах водоохранной зоны	НП: 0,5 т	[Разлив..., 2015]
13	2015	бухта Крашенинникова	не установлен	НП: 100 м ²	[Рядом..., 2015]
14	2015	бухта Крашенинникова	не установлен	НП: 500 м ²	[В Авачинской..., 2015]
15	2016	центральная набережная	не установлен	НП	[На Камчатке..., 2016]
16	2016	бухта Петропавловская	не установлен	НП: 100 м ²	[В акватории..., 2016]
17	2020	бухта Крашенинникова	не установлен	М	[Глава..., 2020]
18	2021	бухта Сероглазка	не установлен	НП	[Утечку..., 2021]
19	2021	бухта Завойко	не установлен	НП: 50 м ²	[Камчатские..., 2021]
20	2022	бухта Турпанка	не установлен	НП	[Нефтяное..., 2022]
21	2022	центральная набережная	не установлен	НП	[Оперативно..., 2022]
22	2023	бухта Раковая	затопление списанного судна	НП	[На Камчатке..., 2023]

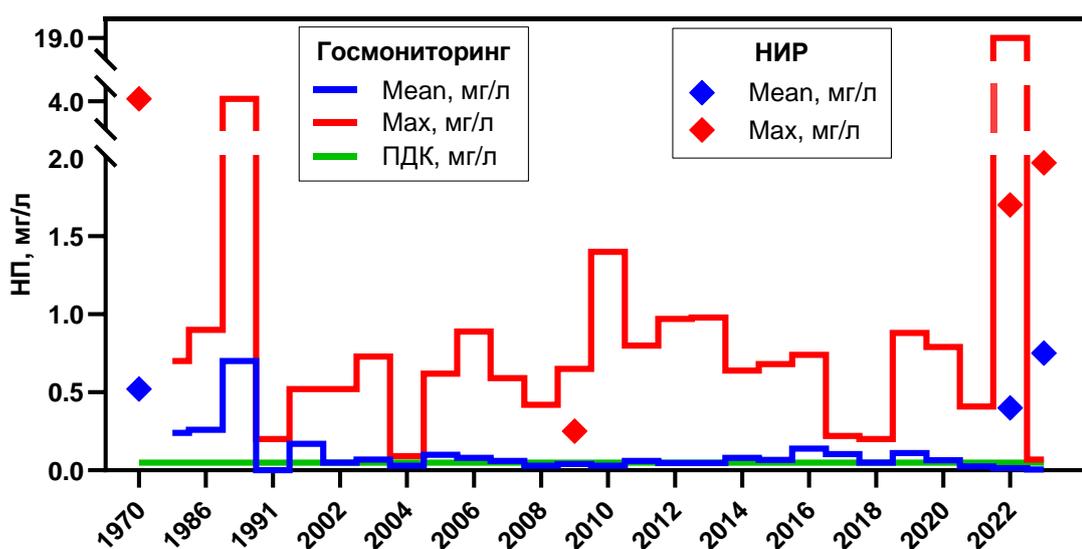


Рис. 3. Среднее и максимально разовое содержания нефтепродуктов в воде Авачинской губы, по данным государственного мониторинга (линии) и проводимых инициативных научно-исследовательских работ (маркеры)

Fig. 3. Average and maximum one-time content of oil products in the water of the Avacha Bay according to state monitoring data (lines) and ongoing initiative research work (markers)

С конца 70-х по 90-е гг. концентрация НП в воде Авачинской губы оставалась примерно одинаковой и составляла в среднем от 0,45 до 0,70 мг/л (от 9 до 14 ПДК) у поверхности и 0,30–0,70 мг/л (6–14 ПДК) у дна. Максимальные значения без учета залповых выбросов регистрировались до значений 4,1 мг/л (82 ПДК) на поверхности и 3,6 мг/л (72 ПДК) у дна. Средняя концентрация по толще бухты в этот период составляла 0,52 мг/л (10,4 ПДК) [Клочкова, Березовская, 2001]. В 1994–1997 гг. концентрация НП в толще воды Авачинской губы снизилась и составляла уже 0,17 мг/л (немногим более 3 ПДК) [Клочкова, Березовская, 2001].

В целом, согласно докладам о состоянии окружающей среды и ежегодникам качества морских вод [<https://minprir.kamgov.ru/ohrana-okruzausej-sredy>, <http://www.oceanography.institute/index.php>], с 1990 г. можно наблюдать снижение средней концентрации НП в водах Авачинской губы (рис. 3). Уже в 2002 г. их содержание составило 0,05 мг/л, что соответствует 1 ПДК. Далее до 2023 г. среднее содержание НП в пробах не превышало 0,1 мг/л, за исключением 2016, 2017 и 2019 гг. Однако максимальное разовое содержание НП в этот период варьировало от 0,09 до 4,1 мг/л, (1,8–82 ПДК), что позволяет констатировать наличие хронического нефтяного загрязнения Авачинской губы (рис. 3).

В инициативных научно-исследовательских работах по мониторингу состояния Авачинской губы регулярно отмечается значительное превышение содержания НП (рис. 3), особенно в портовой зоне. Так, в ноябре 2009 г. в рамках комплексного исследования экологического состояния бухты в местах бункеровки флота максимальное значение в конце позапрошлого десятилетия едва достигало 0,16 мг/л (3,2 ПДК), при среднем – 0,11 мг/л (2 ПДК) [Климова

и др., 2014]. В 2022 г. на семи станциях вдоль северо-восточного побережья бухты были зафиксированы концентрации НП от 0,4 до 1,7 мг/л (8–34 ПДК) [Русанова, Походина, 2022].

С апреля 2022 г. впервые были представлены данные о загрязнении НП донных отложений Авачинской губы в качестве дополнения к комплексному экологическому мониторингу, проводимому Камчатским филиалом ВНИРО с 2013 г. [Русанова, Походина, 2022; Русанова, Седова, 2023]. Выяснилось, что помимо хронического загрязнения вод бухты наблюдается аккумуляция нефтепродуктов в донных отложениях, здесь их значения в 2022 г. варьировали от 134,9 до 188,5 мг/кг. Ранее исследование химического загрязнения донных отложений проводилось в 2009 г. в бух. Раковой, выявленное содержание НП варьировало от 210 до 14 430 мг/л при среднем содержании 6 870 мг/л [Клочкова и др., 2016]. Регистрируемое высокое содержание НП в донных отложениях северо-восточной части бухты за 15-летний период позволяет выделить этот депонирующий компонент в качестве вторичного источника поступления загрязнителя в водную среду.

Особенно следует отметить, что за весь период наблюдений в Авачинской губе на поверхности постоянно регистрируют нефтяную пленку [Качество..., 2005, 2008, 2009, 2012, 2015, 2018, 2021, 2023]. Так, в 2022 г., как и в предыдущие годы, ежедневно в отсутствие льда отмечалось покрытие нефтяной пленкой слабой интенсивности 10% видимой части акватории бухты [Качество..., 2023]. В то же время, согласно показателям качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения высшей категории, в зоне антропогенного воздействия на поверхности не должны обнаруживаться пленки нефтепродуктов, масел, жиров и скопления других примесей [Приказ

Минсельхоза РФ от 13.12.2016 № 552]. Все это, безусловно, свидетельствует о существенном нефтяном загрязнении Авачинской губы в позапрошлом десятилетии и появлении тенденции к повышению содержания НП прибрежных вод в настоящее время.

Современный уровень нефтяного загрязнения прибрежных районов северо-восточной части Авачинской губы

В результате проведенного нами исследования в 2022–2024 гг. было установлено, что за весь период наблюдений содержание НП в прибрежных водах северо-

восточной части Авачинской губы варьировало от 0,01 до 8,57 мг/л (рис. 4). При этом только в 15% проб не было выявлено превышений нормативного уровня содержания НП – 0,05 мг/л, максимальное значение составило 171,4 ПДК. Сезонная динамика изменений концентрации НП в районах исследования выявила общее снижение загрязнителя в летний период до 0,09 мг/л (усредненное значение) и возрастание в осенние месяцы до 3,19 мг/л в сентябре (рис. 4, А). Вероятно, эти изменения обусловлены неравномерным в течение года морским трафиком, ведением погрузо-разгрузочных и ремонтных работ, а также аварийными утечками и разливами НП.

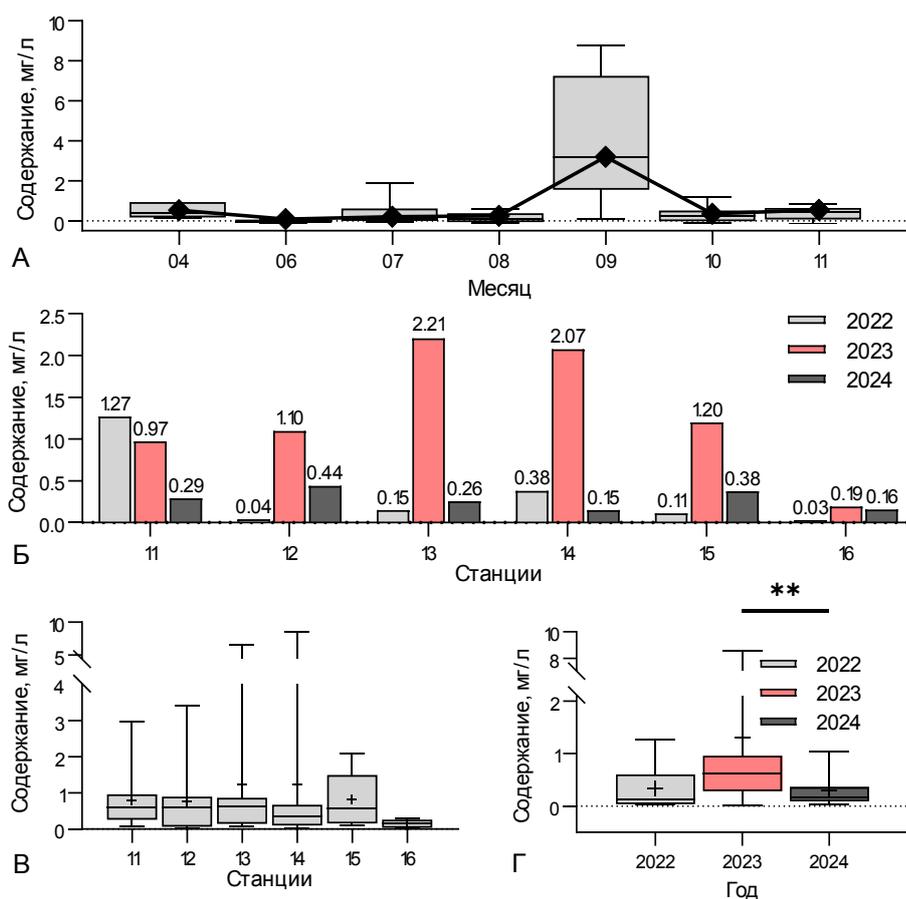


Рис. 4. Уровень содержания нефтепродуктов (мг/л) в воде прибрежных районов северо-восточного побережья Авачинской губы за период 2022–2024 гг.: А – усредненные значения по месяцам, Б – усредненные значения для станций за каждый год исследования, В – усредненные значения для станций за весь период исследования, Г – межгодовая динамика

Fig. 4. The level of oil products (mg/l) in the water of coastal areas of the north-eastern coast of the Avacha Bay during 2022–2024: А – average values by month, Б – average values for stations for each year of the study, В – average values for stations for the entire study period, Г – interannual dynamics

Все станции, расположенные в непосредственной близости к портовой инфраструктуре, характеризовались высоким содержанием НП в воде как за каждый год в отдельности (рис. 4, Б), так и за весь период наблюдений (рис. 4, В). В прибрежной зоне станции 13 и 14 зафиксированы максимальные усредненные уровни содержания этого загрязнителя – 1,24 мг/л (24,8 ПДК), обусловленные высокими содержанием НП в августе 2023 г. (рис. 4, А, В). Однако для станции 11, 12 и 15 характерен стабильно высокий уровень загрязнения НП в течение всего периода наблюдений: усредненные значения в бух. Сероглазке и у мыса Санникова варьировали от 0,77 до 0,83 мг/л (15,4–16,6 ПДК). Следует отметить, что практически для всех исследованных станций максимальные из определенных уровней содержания НП в прибрежных водах городского побережья Авачинской губы приходились на 2023 г.

В то же время в прибрежной зоне бух. Завойко (ст. 16), расположенной в горле Авачинской губы, удаленной от жилой и производственной застройки города, уровень содержания НП был значительно ниже (рис. 4, Б, В). Этот район также характеризуется активным водообменом с океаническими водными массами Авачинского залива. Тем не менее, только 40% проб с этой станции соответствовали санитарным требованиям по химическим показателям. Среднегодовые значения концентрации загрязнителя здесь не превышали 0,19 мг/л (3,8 ПДК), максимально разовые значения были зарегистрированы в апреле 2023 г. – 0,31 мг/л (6,2 ПДК).

В целом за трехлетний период уровень нефтяного загрязнения прибрежных вод северо-восточной части Авачинской губы снизился (рис. 4, Г). Так, усредненное содержание НП в поверхностных водах исследованных станций в 2022 г. составляло

0,33 мг/л, в 2023 г. – 1,30 мг/л и в 2024 г. – 0,29 мг/л. Резкое увеличение содержания НП в прибрежных водах в 2023 г. могло быть связано с увеличением количества заходов и отходов судов в порт на 8% и пассажирских перевозок на 47% по отношению к 2022 г., а также открытием международной регулярной контейнерной линии между Китаем и Россией по Северному морскому пути [Учимся..., 2024].

Согласно отчетам Министерства природных ресурсов и экологии Камчатского края [Доклад..., 2023, 2024], за последние несколько лет среднегодовое содержание нефтяных углеводородов в толще воды Авачинской губы снизилось в несколько раз: в 2022 г. составило 0,3 ПДК и в 2023 г. – 0,1 ПДК (см. рис. 3). Однако в приустьевой зоне рек Паратунки и Авачи (ст. 5) продолжают фиксировать максимальные значения содержания НП – от 3 ПДК и выше, несмотря на общее снижение количества поступающих НП с речным стоком в Авачинскую губу к 2022 г. Исследования уровня нефтяного загрязнения почв Петропавловска-Камчатского в 2023 г. не выявили существенных превышений рекомендованного нормативного значения на территории города, прилегающей к побережью Авачинской губы [Мартыненко и др., 2024]. Исходя из этого, следует предположить, что основным источником поступления НП в воды бухты является морское судоходство, работа портовой инфраструктуры и связанные с ними утечки и разливы НП, а не речной и терригенный сток загрязнителей в акваторию.

Сравнивая полученные данные с результатами проведенного в ноябре 2009 г. комплексного исследования экологического состояния Авачинской губы в местах бункеровки флота [Климова и др., 2014], следует отметить существенное повышение уровня содержания НП в водах бухты

в настоящее время. Так, их максимальное значение в конце позапрошлого десятилетия едва достигало 0,16 мг/л при среднем – 0,11 мг/л. В бух. Сероглазке в ноябре 2009 г. концентрация загрязняющего вещества варьировала в пределах 0,11–0,15 мг/л (2–3 ПДК), тогда как в это же время в 2022 и 2023 гг. содержание НП изменялось в пределах 0,01–1,27 мг/л (0,02–24 ПДК). Результаты проведенного исследования подтверждают, что прибрежные экосистемы северо-восточного побережья Авачинской губы подвергаются длительному хроническому воздействию НП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интенсивное антропогенное воздействие на акваторию Авачинской губы и ее прибрежные экосистемы имеет более чем вековую историю. Наибольший вклад в загрязнение и деградацию среды обитания морских прибрежных сообществ среди всех загрязняющих веществ вносят нефтепродукты. При этом основными источниками их поступления в бухту является активное судоходство и эксплуатация разнообразной портовой инфраструктуры г. Петропавловска-Камчатского. За трехлетний период наблюдений нами установлено, что содержание НП в береговой зоне северо-восточной части Авачинской губы может превышать установленный норматив в 171,4 раза. Отсутствие станций государственного экологического мониторинга в прибрежных районах, особенно в зонах рекреации и в местах сосредоточения литоральных и сублиторальных сообществ гидробионтов, не дает полной оценки экологического состояния Авачинской губы.

Несмотря на положительную динамику снижения НП в толще и на поверхности вод бухты, наблюдение за этим загрязнителем необходимо продолжать и расши-

рять перечень объектов исследования. В первую очередь в таких депонирующих средах, как донные отложения. Дополнительно следует отдельно исследовать устойчивость массовых видов бентосных сообществ Авачинской губы в ответ на краткосрочное высокоинтенсивное воздействие аварийных разливов НП для возможности прогнозирования экологических последствий и принятия мер по их устранению. Кроме того, для большей информативности состояния водоема следует пересмотреть расположение станций государственного экологического мониторинга, в настоящее время достаточно удаленных от причальных сооружений. Особую актуальность мониторинговые исследования в Авачинской губе будут иметь при увеличении грузового потока и пассажирских перевозок порта Петропавловска-Камчатского и усилении его роли как опорного пункта Северного морского пути в ближайшие десятилетия.

ЛИТЕРАТУРА

- Авачинская губа на Камчатке загрязнена нефтепродуктами. 2010. URL: <http://trudost.ru/?p=27546> (дата обращения: 10.10.2024).
- Берингово море. Состояние морской среды. 2010. URL: <http://portal.esimo.ferhri.ru/portal/portal/poi/bering/pacificKISWindowBering;jsessionid=16BD0B302CDE409BE18D653988A0A172?action=2&uri=%2F%3F21%2F> (дата обращения: 10.10.2024)
- Бузолева Л.С., Безвербная И.П., Журавель Е.В., Калитина Е.Г. 2006. Микробиологический анализ загрязнения окраинных морей северо-западной части Тихого океана. *Океанология*. Т. 46. № 1. С. 55–62.
- В Авачинской бухте на Камчатке ликвидируют огромное пятно нефтепродуктов.

2015. URL: <https://kamchatinfo.com/news/ecology/detail/10036/> (дата обращения: 10.10.2024).
- В акватории Петропавловска-Камчатского ликвидирован разлив нефтепродуктов. 2016. URL: <https://ria.ru/20160602/1441818784.html> (дата обращения: 10.10.2024).
- Войтовская А.И., Орлова Т.Ю. 2024. Распределение потенциально токсичных динофлагеллят у берегов Камчатского полуострова в августе-сентябре 2023 года. *Материалы VIII Всероссийской научной конференции молодых ученых «КИМО-2024»*. С. 278–279.
- Глава региона взял на личный контроль ликвидацию последствий аварийного разлива нефтепродуктов в Вилучинске. 2020. URL: <https://www.kamgov.ru/news/glava-regiona-vzal-na-licnyj-kontrol-likvidaciu-posledstvij-avarijnogo-razliva-nefteproduktov-v-vilucinske-31068> (дата обращения: 8.10.2024).
- Димитриева Г.Ю., Безвербная И.П., Христофорова Н.К. 2001. Микробная индикация – возможный подход для мониторинга тяжелых металлов в дальневосточных морях. *Известия ТИНРО*. Т. 128. Ч. 3. С. 719–736.
- Доклад о состоянии окружающей среды в Камчатском крае в 2022 году. 2023. Министерство природных ресурсов и экологии Камчатского края. Петропавловск-Камчатский: Министерство природных ресурсов и экологии Камчатского края. 418 с.
- Доклад о состоянии окружающей среды в Камчатском крае в 2023 году. 2024. Министерство природных ресурсов и экологии Камчатского края. Петропавловск-Камчатский: Министерство природных ресурсов и экологии Камчатского края. 424 с.
- Камчатские спасатели ликвидировали разлив нефтепродуктов в бухте Завойко. 2021. URL: <https://kam24.ru/news/main/20210626/82362.html> (дата обращения: 10.10.2024).
- Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2003. 2005. Метеоагентство Росгидромета. 112 с.
- Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2005. 2008. Москва: Метеоагентство Росгидромета. 166 с.
- Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2008. 2009. Обнинск: ОАО «ФОР». 192 с.
- Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2011. 2012. Обнинск: Артифекс. 200 с.
- Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2014. 2015. Москва: Наука. 156 с.
- Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2017. 2018. Москва: Наука. 295 с.
- Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2020. 2021. Москва: Наука. 283 с.
- Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2022. 2023. Москва: ФГБУ «ГОИН». 248 с.
- Климова А.В., Касперович Е.В., Кусиди А.Э., Клочкова Н.Г. 2014. Бурая водоросль *Saccharina bongardiana* как показатель экологического состояния мест нефтяного загрязнения в Авачинской губе (юго-восточная Камчатка). *Вестник Камчатского государственного технического университета*. Вып. 29. С. 65–74.
- Климова А.В., Позолотина Л.А., Рудев П.В. и др. 2023. Оценка уровня загрязнения металлами прибрежных районов Авачинской губы (юго-восточная Камчатка) с использованием видов-биомарке-

- ров. *Известия Субтропического научного центра Российской академии наук*. № 3–2. С. 137–151.
- Клочкова Н.Г., Березовская В.А. 2001. Макрофитобентос Авачинской губы и его антропогенная деструкция. Владивосток: Дальнаука. 208 с.
- Клочкова Н.Г., Климова А.В., Очеретяна С.О. и др. 2016. Воздействие антропогенного загрязнения на состояние макрофитобентоса в бухте Раковая (Авачинская губа, юго-восточная Камчатка). *Вестник Камчатского государственного технического университета*. Вып. 35. С. 53–64.
- Кондратюк В.И., Липовка А.В. 1985. 50 лет Камчатскому УГКС. *Вопросы географии Камчатки*. Вып. 9. С. 157–162.
- Коровин А.Г. 2014. Состояние безопасности мореплавания и перспективы внедрения автоматизированных систем обеспечения безопасности мореплавания в камчатском регионе. *Вопросы рыболовства*. Т. 15. № 2. С. 328–343.
- Лепская Е.В., Тепнин О.Б., Коломейцев В.В. и др. 2014. Исторический обзор исследований и основные результаты комплексного экологического мониторинга Авачинской губы в 2013 г. *Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана*. № 34. С. 5–21.
- Мартыненко Д.О., Ильюшенко Н.А., Позолотина Л.А., Климова А.В. 2024. Содержание нефтепродуктов в почвах города Петропавловска-Камчатского (Камчатский край). *Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции «Биоразнообразие и антропогенная трансформация природных экосистем»*. С. 95–102.
- На Камчатке ликвидированы последствия разлива нефтепродуктов. 2005. URL: <https://ria.ru/20051019/41820557.html> (дата обращения: 10.10.2024).
- На Камчатке расследуют причины разливы нефти. 2008. URL: <https://www.pravda.ru/news/society/279840-neft/> (дата обращения: 10.10.2024).
- На Камчатке произошел разлив нефтепродуктов в Авачинской бухте. 2016. URL: <https://domsovet.tv/articles/nakamchatke-proizoshel-razliv-nefteproduktov-v-avachinskoj-bukhte/> (дата обращения: 10.10.2024).
- На Камчатке на месте затопления судна обнаружен разлив нефтепродуктов в бухте. 2023. URL: https://kamchatinfo.com/news/ecology/detail/55626/?sphrase_id=2466238 (дата обращения: 10.10.2024).
- Нефтяное пятно обнаружили рыбаки в бухте Турпанка на Камчатке. 2022. URL: https://kamchatka.aif.ru/incidents/neftyano_eyatno_obnaruzhili_rybaki_v_bukheturpanka_na_kamchatke (дата обращения: 10.10.2024).
- Оперативно найти виновных в двух экологических происшествиях на воде удалось на Камчатке. 2022. URL: <https://www.kamgov.ru/news/operativno-najti-vinovnyh-v-dvuh-ekologiceskih-proisshestviah-na-vode-udalos-na-kamcatke-51979> (дата обращения: 10.10.2024).
- Очеретяна С.О., Походина М.А., Якушева И.А. 2014. Исследование химического состава массовых видов зеленых водорослей прибрежных вод Камчатки. *Вестник Северо-восточного научного центра ДВО РАН*. № 2. С. 70–78.
- Позолотина Л.А., Климов А.В., Клочкова Н.Г. 2019. Содержание микроэлементов у камчатских красных водорослей *Neoptilota asplenioides* и *Paltaria stenogona*. *Материалы X Национальной (всероссийской) научно-практической конференции «Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое»*. С. 119–123.

- Приказ Минсельхоза РФ от 13.12.2016 № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (Зарегистрировано в Минюсте РФ 13.01.2017 № 45203). URL: <https://minjust.consultant.ru/documents/22231?items=1&page=2> (дата обращения: 10.10.2024).
- Разлив нефтепродуктов локализован на Камчатке. 2015. URL: <https://www.interfax-russia.ru/far-east/news/razliv-nefteproduktov-lokalizovan-v-stolice-kamchatki> (дата обращения: 10.10.2024).
- Рогатых С. В., Пархутова И. И., Ключкова Н. Г. 2024. Общая характеристика эпимикробиоценозов бурых водорослей *Hedophyllum bongardianum* и *Fucus distichus* и микробиота среды их обитания в Авачинской губе (юго-восточная Камчатка). *Материалы XXV Всероссийской научной конференции «Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей»*. С. 237–243.
- Рудев П. В., Климова А. В. 2022. Аккумуляция тяжелых металлов в мидии тихоокеанской (*Mytilus trossulus*) в бухте Петропавловской (Авачинская губа, юго-восточная Камчатка) в 2021 г. *Материалы XIII Национальной (всероссийской) научно-практической конференции «Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промышленное и техническое использование»*. С. 50–54.
- Русанова В. А., Седова Н. А. 2023. Определение содержания нефтепродуктов в воде и донных отложениях Авачинской губы в 2022 году. *Материалы XIV Национальной (всероссийской) научно-практической конференции «Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промышленное и техническое использование»*. С. 149–152.
- Русанова В. А., Походина М. А. 2022. Донные отложения как информативный показатель качества вод Авачинской бухты. *Материалы X международной научно-практической конференции «Современные проблемы и перспективы развития рыбохозяйственного комплекса»*. С. 304–306.
- Рядом с военным заводом на Камчатке плавает нефтяное пятно. 2015. URL: <https://kamchatka.aif.ru/incidents/ryadom-s-voennym-zavodom-na-kamchatke-plavaet-neftyanoje-pyatno> (дата обращения: 10.10.2024).
- Савич В. П. 1914. Альгологический объезд Авачинской губы в мае 1909 г. *Камчатская экспедиция Федора Павловича Рябушинского. Ботанический отдел*. Вып. II. С. 449–472.
- Сергеенко Н. В., Устименко Е. А. 2016. Санитарно-микробиологические показатели воды Авачинской губы. *Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Морские биологические исследования»*. С. 214–217.
- Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Камчатскому краю (Камчатстат). 2024. URL: <https://41.rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 10.10.2024).
- Токранов А. М., Мурашева М. Ю., Белова Т. П. 2018. Оценка экологического состояния прибрежных вод Авачинской губы (юго-восточная Камчатка) по содержанию тяжелых металлов в буром морском петушке *Alectrias alectrolophus* (Stichaeidae). *Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Загрязнение морской среды: экологический*

- мониторинг, биоиндикация, нормирование». С. 261–266.
- Утечку нефтепродуктов ликвидируют в Авачинской бухте. 2021. URL: <https://www.kamgov.ru/news/utecku-nefteproduktov-likvidiruut-v-avacinskoj-buhte-43463> (дата обращения: 10.10.2024).
- Учимся и учим безопасности мореплавания. 2024. *Морские порты*. № 6 (227). URL: <https://morvesti.ru/analitika/1688/112072/> (дата обращения: 17.10.2024).
- Федорченко В.П., Макаров Е.О., Ключкова Н.Г. 2011. О возможности использования *Saccharina bongardiana* (Phaeorhiza, Laminariales) в качестве индикатора металлического загрязнения морских прибрежных вод Камчатки. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. Вып. 17. С. 101–106.
- Чалов С.Р., Цыпленков А.С., Школьный Д.И. и др. 2022. К оценке возможного влияния материкового стока на гибель гидробионтов в Авачинском заливе Тихого океана (Камчатка). *Известия Русского географического общества*. Т. 154. № 4. С. 69–84.
- Orlova T.Y., Aleksanin A.I., Lepskaya T.V. et al. 2022. A massive bloom of *Karenia species* (Dinophyceae) off the Kamchatka coast, Russia, in the fall of 2020. *Harmful Algae*. Vol. 120. Art. № 102337. DOI: 10.1016/j.hal.2022.102337.
- Avacha Bay in Kamchatka is polluted with oil products. 2010. URL: <http://trudost.ru/?p=27546> (accessed: 10.10.2024) (in Russian).
- The Bering Sea. State of the marine environment. 2010. URL: <http://portal.esimo.ferhri.ru/portal/portal/poi/bering/pacificKISWindowBering;jsessionid=16BD0B302CDE409BE18D653988A0A172?action=2&uri=%2F%3F21%2F> (accessed: 10.10.2024) (in Russian).
- Buzoleva L.S., Bezverbnaya I.P., Zhuravel E.V., Kalitina E.G. 2006. Microbiological analysis of the contamination of marginal seas in the northwestern part of the Pacific Ocean. *Okeanologiya (Oceanology)*. Vol. 46. № 1. P. 50–56 (in Russian).
- In the Avacha Bay in Kamchatka, they will eliminate a huge spot of petroleum products. 2015. URL: <https://kamchatinfo.com/news/ecology/detail/10036/> (accessed: 10.10.2024) (in Russian).
- Spill of oil products liquidated in Petropavlovsk-Kamchatsky water area. 2016. URL: <https://ria.ru/20160602/1441818784.html> (accessed: 10.10.2024) (in Russian).
- Voitovskaya A.I., Orlova T.Yu. 2024. Distribution of potentially toxic dinoflagellates off the coast of the Kamchatka Peninsula in August–September 2023. *Proceedings of the VIII All-Russian scientific conference of young scientists “KIMO-2024”*. P. 278–279 (in Russian).
- The head of the region took personal control of the elimination of the consequences of an emergency oil spill in Vilyuchinsk. 2020. URL: <https://www.kamgov.ru/news/glava-regiona-vzal-na-licnyj-kontrol-likvidaciu-posledstvij-avarijnogo-razliva-nefteproduktov-v-vilucinske-31068> (accessed: 8.10.2024) (in Russian).
- Dimitrieva G.Yu., Bezverbnaya I.P., Khristoforova N.K. 2001. Microbial indication as possible approach for heavy metals monitoring in Far Eastern seas. *Izvestiya TINRO (Transactions of TINRO)*. Vol. 128. Issue 3. P. 719–736 (in Russian).
- Report on the state of the environment in the Kamchatka Territory in 2022. 2023. Petropavlovsk-Kamchatsky: Ministry of Natural Resources and Ecology of the Kamchatka Territory. 418 p. (in Russian).

REFERENCES

- Report on the state of the environment in the Kamchatka Territory in 2023. 2024. Petropavlovsk-Kamchatsky: Ministry of Natural Resources and Ecology of the Kamchatka Territory. 424 p. (in Russian).
- Kamchatka rescuers liquidated oil spill in Zavoiko Bay. 2021. URL: <https://kam24.ru/news/main/20210626/82362.html> (accessed: 10.10.2024) (in Russian).
- Sea water quality by hydrochemical indicators. Yearbook 2003. 2005. Moscow: Roshydromet Meteorological Agency. 112 p. (in Russian).
- Sea water quality by hydrochemical indicators. Yearbook 2005. 2008. Moscow: Roshydromet Meteorological Agency. 166 p. (in Russian).
- Sea water quality by hydrochemical indicators. Yearbook 2008. 2009. Obninsk: JSC "FOP". 192 p. (in Russian).
- Sea water quality by hydrochemical indicators. Yearbook 2011. 2012. Obninsk: Artifeks Publ. 200 p. (in Russian).
- Sea water quality by hydrochemical indicators. Yearbook 2014. 2015. Moscow: Nauka Publ. 156 p. (in Russian).
- Sea water quality by hydrochemical indicators. Yearbook 2017. 2018. Moscow: Nauka Publ. 295 p. (in Russian).
- Sea water quality by hydrochemical indicators. Yearbook 2020. 2021. Moscow: Nauka Publ. 283 p. (in Russian).
- Sea water quality by hydrochemical indicators. Yearbook 2022. 2023. Moscow: FSBI "SOI". 248 p. (in Russian).
- Klimova A.V., Kasperovich E.V., Kusidi A.E., Klochkova N.G. 2014. Brown alga *Saccharina bongardiana* as an indicator of ecological state of oil polluted places in Avacha Bay (southeastern Kamchatka). *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta (Bulletin of the Kamchatka State Technical University)*. Vol. 29. P. 65–74 (in Russian).
- Klimova A.V., Pozolotina L.A., Rudev P.V. et al. 2023. Assessment of the level of metal pollution in the coastal areas of the Avacha Bay (southeastern Kamchatka) using biomarker species. *Izvestija Subtropicheskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk (Proceedings of the Subtropical Scientific Center of the Russian Academy of Sciences)*. Vol. 3–2. P. 137–151 (in Russian).
- Klochkova N.G., Berezovskaya V.A. 2001. Macrophytobenthos of the Avacha Bay and its anthropogenic destruction. Vladivostok: Dalnauka Publ. 208 p. (in Russian).
- Klochkova N.G., Klimova A.V., Ocheretyana S.O. et al. 2016. Influence of the antropogenous pollution on Rakovaya bay benthic communities (Avacha bay, southeastern Kamchatka). *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta (Bulletin of the Kamchatka State Technical University)*. Vol. 35. P. 53–64 (in Russian).
- Kondratyuk V.I., Lipovka A.V. 1985. 50 years of Kamchatka UGKS. *Voprjisy geografii Kamchatki (Problems of the Geography of Kamchatka)*. Issue 9. P. 157–162 (in Russian).
- Korovin A.G. 2014. State of maritime safety and prospects for the introduction and development of automated systems to ensure the safety of navigation in the Kamchatka region. *Voprosy rybolovstva (Problems of Fisheries)*. Vol. 15. №. 2. P. 328–343 (in Russian).
- Lepskaya E.V., Tepnin O.B., Kolomeitsev V.V. et al. 2014. Historical research review and main results of integrated environmental monitoring of the Avacha Bay in 2013. *Proceedings of scientific conference "Research of aquatic biological resources of Kamchatka and the northwestern Pacific Ocean"*. Vol. 34. P. 5–21 (in Russian).

- Martynenko D.O., Ilyushenko N.A., Pozolotina L.A., Klimova A.V. 2024. Content of petroleum products in the soils of Petropavlovsk-Kamchatsky (Kamchatka Krai). *Materials of the XII All-Russian scientific and practical conference "Biodiversity and anthropogenic transformation of natural ecosystems"*. P. 95–102 (in Russian).
- In Kamchatka, the consequences of an oil spill have been eliminated. 2005. URL: <https://ria.ru/20051019/41820557.html> (accessed: 10.10.2024) (in Russian).
- In Kamchatka is investigating the causes of oil spills. 2008. URL: <https://www.pravda.ru/news/society/279840-neft/> (accessed: 10.10.2024) (in Russian).
- In Kamchatka, there was a spill of oil products in the Avacha Bay. 2016. URL: <https://domsovet.tv/articles/na-kamchatke-proizoshel-razliv-nefteproduktov-v-avachinskoj-bukhte/> (accessed: 10.10.2024) (in Russian).
- In Kamchatka, at the site of the sinking of the ship, an oil spill was found in the bay. 2023. URL: https://kamchatinfo.com/news/ecology/detail/55626/?sphrase_id=2466238 (accessed: 10.10.2024) (in Russian).
- An oil slick was discovered by fishermen in Turpanka Bay in Kamchatka. 2022. URL: https://kamchatka.aif.ru/incidents/neftyan_oe_pyatno_obnaruzhili_rybaki_v_buhte_turpanka_na_kamchatke (accessed: 10.10.2024) (in Russian).
- It was possible to quickly find those responsible for two environmental accidents on the water in Kamchatka. 2022. URL: <https://www.kamgov.ru/news/operativno-najti-vinovnyh-v-dvuh-ekologiceskih-proisshestviah-na-vode-udalos-na-kamcatke-51979> (accessed: 10.10.2024) (in Russian).
- Ocheretyana S.O., Pokhodina M.A., Yakusheva I.A. 2014. Investigation of the chemical composition of mass species of green algae in the coastal waters of Kamchatka. *Vestnik Severo-vostochnogo nauchnogo centra DVO RAN (Bulletin of the North-East Scientific Center, Russia Academy of Sciences Far East Branch)*. Vol. 2. P. 70–78 (in Russian).
- Pozolotina L.A., Klimov A.V., Klochkova N.G. 2019. Trace element content of Kamchatka red algae *Neoptilota asplenioides* and *Palmaria stenogona*. *Proceedings of the X National (All-Russian) scientific and practical conference "Natural resources, their current state, protection, commercial and technical"*. P. 119–123 (in Russian).
- Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation of 13 December, 2016 № 552 "On approval of Water Quality standards for water bodies of Fisheries significance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fisheries significance". URL: <https://minjust.consultant.ru/documents/22231?items=1&page=2://minjust.consultant.ru/documents/22231?items=1&page=2> (accessed: 10.10.2024) (in Russian).
- The oil spill is localized in Kamchatka. 2015. URL: <https://www.interfax-russia.ru/far-east/news/razliv-nefteproduktov-lokalizovan-v-stolice-kamchatki> (accessed: 10.10.2024) (in Russian).
- Rogatykh S.V., Parkhutova I.I., Klochkova N.G. 2024. General characteristics of epimicrobiocenoses of brown algae *Hedophyllum bongardianum* and *fucus distichus* and microbiota of their habitat in the Avacha Bay (southeastern Kamchatka). *Proceedings of the XXV All-Russian Scientific Conference "Conservation of biodiversity of Kamchatka and coastal waters"*. P. 237–243 (in Russian).
- Rudev P.V., Klimova A.V. 2022. Heavy metal accumulation in the Pacific mussel

- (*Mytilus trossulus*) in Petropavlovsk Bay (Avacha Bay, southeastern Kamchatka) in 2021. *Proceedings of the XIII National (All-Russian) scientific and practical conference* “Natural resources, their current state, protection, commercial and technical use”. P. 50–54 (in Russian).
- Rusanova V.A., Sedova N.A. 2023. Determination of oil products content in water and bottom sediments of the Avacha Bay in 2022. *Proceedings of the XIV National (All-Russian) scientific and practical conference* “Natural resources, their current state, protection, commercial and technical use”. P. 149–152 (in Russian).
- Rusanova V.A., Pokhodina M.A. 2022. Bottom sediments as an informative indicator of water quality in the Avacha Bay. *Proceedings of the X International scientific and practical conference* “Modern problems and prospects of development of the fisheries complex”. P. 304–306 (in Russian).
- An oil slick is floating near a military plant in Kamchatka. 2015. URL: https://kamchatka.aif.ru/incidents/ryadom_s_voenny_m_zavodom_na_kamchatke_plavaet_neft_yanoe_pyatno (accessed: 10.10.2024) (in Russian).
- Savich V.P. 1914. Algological detour of the Avacha Bay in May 1909. *Kamchatka expedition of Fyodor Pavlovich Ryabushinsky. Botanical department. Issue II*. P. 449–472 (in Russian).
- Sergeenko N.V., Ustimenko E.A. 2016. Sanitary and microbiological parameters of water in the Avacha Bay. *Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation* “Marine biological research”. P. 214–217 (in Russian).
- Rosstat regional office of Kamchatka Territory. 2024. URL: <https://41.rosstat.gov.ru/> (accessed: 10.10.2024) (in Russian).
- Tokranov A.M., Murasheva M.Yu., Belova T.P. 2018. Assessment of the ecological state of the coastal waters of the Avacha Bay (southeastern Kamchatka) by the content of heavy metals in the brown sea cockerel *Alectrias alectrolophus* (*Stichaeidae*). *Proceedings of the All-Russian scientific conference with international participation* “Marine Pollution: ecol. monitoring, bioindication, rationing”. P. 261–266 (in Russian).
- Oil products leak is being liquidated in Avacha Bay. 2021. URL: <https://www.kamgov.ru/news/utecku-nefteproduktov-likvidiruut-v-avacinskoj-buhte-43463> (accessed: 10.10.2024) (in Russian).
- We learn and teach safety of navigation. 2024. *Sea ports*. № 6 (227). URL: <https://morvesti.ru/analitika/1688/112072/> (accessed: 17.10.2024) (in Russian).
- Fedorchenko V.P., Makarov E.O., Klochko N.G. 2011. Possibilities of using of *Saccharina bongardiana* (Phaeophyta, Laminariales) for biomonitoring of metallic pollution of Kamchatka’s marine coastal seawaters. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta (Bulletin of the Kamchatka State Technical University)*. Vol. 17. P. 101–106 (in Russian).
- Chalov S.R., Tsyplenkov A.S., Shkolny D.I. et al. 2022. Overland runoff and its impact on hydrobiont mortality in Avachinsky gulf (Pacific Ocean, Kamchatka). *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva (Regional Research of Russia)*. 2022. Vol. 154. Issue. 4. P. 69–84 (in Russian).
- Orlova T.Y., Aleksanin A.I., Lepskaya T.V. et al. 2022. A massive bloom of *Karenia species* (Dinophyceae) off the Kamchatka coast, Russia, in the fall of 2020. *Harmful Algae*. Vol. 120. Art. № 102337. DOI: 10.1016/j.hal.2022.102337 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Мартыненко Дарина Олеговна – Камчатский государственный технический университет; 683003, Россия, Петропавловск-Камчатский; магистрант; darri.martynenko@yandex.ru. SPIN-код: 3232-5074, Author ID: 1267753.

Martynenko Darina Olegovna – Kamchatka State Technical University; 683003, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Master's Student; darri.martynenko@yandex.ru. SPIN-code: 3232-5074, Author ID: 1267753.

Позолотина Лилия Андреевна – Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН; 683006, Россия, Петропавловск-Камчатский; ведущий инженер Аналитического центра; pozolotina@mail.ru. SPIN-код: 1741-5302, Author ID: 918275.

Pozolotina Lilia Andreevna – Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS; 683006, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Leading Engineer of Analytical Center; pozolotina@mail.ru. SPIN-code: 1741-5302, Author ID: 918275.

Назарова Мария Анатольевна – Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН; 683006, Россия, Петропавловск-Камчатский; младший научный сотрудник Аналитического центра; nazarovamar@mail.ru. SPIN-код: 1331-1709, Author ID: 994002; Scopus ID: 57211584379.

Nazarova Maria Anatolyevna – Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS; 683006, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Junior Researcher of Analytical Center; nazarovamar@mail.ru. SPIN-code: 1331-1709, Author ID: 994002; Scopus ID: 57211584379.

Климова Анна Валерьевна – Камчатский государственный технический университет; 683003, Россия, Петропавловск-Камчатский; кандидат биологических наук, заведующий сектором коллективного использования научного оборудования; annaklimovae@mail.ru. SPIN-код: 3188-5428, Author ID: 732623; Scopus ID: 56711736100.

Klimova Anna Valereevna – Kamchatka State Technical University; 683003, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Candidate of Biological Sciences, Head of the Center for Collective Use of Scientific Equipment; annaklimovae@mail.ru. SPIN-code: 3188-5428, Author ID: 732623; Scopus ID: 56711736100.

Статья поступила в редакцию 27.10.2024; одобрена после рецензирования 20.12.2024; статья принята к публикации 20.03.2025.

The article was submitted 27.10.2024; approved after reviewing 20.12.2024; accepted for publication 20.03.2025.

Для цитирования: Мартыненко Д.О., Позолотина Л.А., Назарова М.А., Климова А.В. 2025. Загрязнение нефтепродуктами прибрежных акваторий Авачинской губы (Авачинский залив). *Вестник Камчатского государственного технического университета*. Вып. 71. С. 87–107. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2025-71-87-107>.

For citation: Martynenko D.O., Pozolotina L.A., Nazarova M.A., Klimova A.V. 2025. Oil products pollution of the Avacha Bay coastal areas (Avachinsky Gulf). *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta (Bulletin of Kamchatka State Technical University)*. Iss. 71. P. 87–107 (in Russian). <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2025-71-87-107>.

Научная статья

УДК 504.4:574.5(265.5)

DOI: 10.17217/2079-0333-2025-71-108-119

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЯХ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА

Зарипова К.М., Тихонова Е.А.

Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, г. Севастополь, пр-кт Нахимова, 2.

Изучение взвешенных веществ в морской воде является важным для оценки состояния экосистем и отслеживания распространения поллютантов, попадающих в среду в результате деятельности человека. В работе приводятся значения концентрации взвешенных веществ в морской воде из поверхностного и придонного горизонтов прибрежных акваторий юго-восточной части полуострова Камчатка. Концентрации определены при помощи вакуумной фильтрации с нитроцеллюлозными мембранными фильтрами с ячейей 0,45 мкм. Проведен анализ зависимости концентрации взвешенных веществ в воде прибрежных акваторий от ряда показателей степени урбанизированности камчатского побережья с учетом отдельных природных факторов.

Ключевые слова: взвешенные вещества, загрязнение моря, Тихий океан, урбанизация побережья, юго-восточная часть п-ова Камчатка.

Original article

DISTRIBUTION OF SUSPENDED MATTER IN THE COASTAL WATERS OF THE KAMCHATKA PENINSULA

Zaripova K.M., Tikhonova E.A.

A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Nakhimov Ave. 2.

The study of suspended matter in seawater is crucial for assessing ecosystem health and monitoring the spread of pollutants caused by human activities. This paper presents data on the concentrations of suspended matter in seawater from surface and bottom layers of coastal areas in the southern part of the Kamchatka Peninsula. The concentrations were measured using vacuum filtration and nitrocellulose filters with a pore size of 0,45 micrometers. To analyze the dependence of suspended matter concentrations in coastal waters on various urbanization parameters along the shoreline, taking into account individual natural factors, was made.

Key words: suspended matter, marine pollution, Pacific Ocean, coastal urbanisation, the southeastern part of Kamchatka Peninsula.

ВВЕДЕНИЕ

Взвешенные вещества (ВВ) – это частицы минерального и органического происхождения размером от долей микрометров до нескольких миллиметров, находящиеся в водной среде во взвешенном состоянии. Методически ВВ определяются как вещества, извлеченные из воды путем фильтрования (на фильтре с диаметром пор 0,45 мкм) или центрифугирования согласно ГОСТ 30813-2002.

ВВ являются важным индикатором загрязненности водных объектов, существенно влияя на их физические свойства (прозрачность, цвет воды) и химический состав. Они обладают сорбционными свойствами, благодаря чему способны аккумулировать загрязняющие вещества, выступая в роли их переносчиков. При изменении условий среды (например, pH или минерализации) ВВ могут становиться источником вторичного загрязнения. При значительном поступлении ВВ со сточными водами процесс самоочищения водных объектов замедляется: осаждаясь на дно, они формируют мощные отложения, где активизируются бактериальные анаэробные процессы. Эти процессы нарушают экосистемное равновесие, что особенно критично для водоемов рыбохозяйственного значения [Драчев, 1941].

Актуальность изучения ВВ в прибрежных акваториях Камчатки определяется их важной ролью в поддержании экосистемного баланса, значением для рыбохозяйственной деятельности и необходимостью оценки антропогенного воздействия. Материковый сток является наиболее вероятным агентом влияния процессов на водосборе на экосистему океана [Чалов и др., 2022]. ВВ существенно влияют на прозрачность воды, распределение биогенных элементов и транспорт загрязняющих ве-

ществ. Камчатские экосистемы отличаются уникальностью и высокой уязвимостью к изменениям гидрологического режима. Они служат средой обитания многих промысловых видов рыб и морских организмов, что делает мониторинг ВВ важным инструментом для выявления изменений, вызванных как природными процессами, так и антропогенными факторами, включая урбанизацию [Чалов, Леман, 2019; Кашутин и др., 2020].

Исследования показывают существенное влияние стока с урбанизованных территорий на качество поверхностных, в том числе морских, вод [Федорова, 2011]. В урбанизованных зонах, где значительная часть территории с твердыми покрытиями, загрязняющие вещества менее активно сорбируются почвами и чаще поступают в водоемы с поверхностным стоком. Это приводит к значительным концентрациям ВВ (до 3 000–4 000 мг/дм³), нефтепродуктов (5–45 мг/дм³), биологически потребляемого кислорода (80–1 000 мг О/дм³) и ионов тяжелых металлов (0,1–10 мг/дм³) в поверхностных водах [Китаев, 1997]. Роль урбанизованного стока в загрязнении водных объектов является существенной и требует учета. В частности, рядом авторов отмечается, что концентрация ВВ в прибрежных акваториях рядом с урбанизованными побережьями значительно превышает аналогичные показатели в удаленных от городов зонах. Это обусловлено воздействием поверхностного стока, включающего загрязненные воды с городских территорий, содержащие частицы почвы, биогенные вещества, нефтепродукты и тяжелые металлы [Valette-Silver et al., 1999; Курочкина и др., 2013; Wang et al., 2022; Zhang et al., 2023]. Например, исследования в юго-западной части Саравака (Борнео) показали, что концентрации ВВ в районах с интенсивной антропогенной

нагрузкой были в несколько раз выше, чем в природных акваториях [Wang et al., 2022]. Аналогичные результаты были получены при анализе прибрежных вод Черного моря, где урбанизированные побережья характеризуются значительными превышениями норм содержания ВВ [Беляева, 2012].

Целью данной работы является оценка взаимосвязи между концентрацией ВВ в воде прибрежных акваторий полуострова

Камчатка и показателями степени урбанизированности побережья с учетом отдельных природных факторов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работы проводили с 15 августа по 20 сентября 2023 г. в рамках рейса 23/4 НИС «Профессор Мультановский» в акваториях Северо-Западной Пацифики и юго-восточной части Охотского моря (рис. 1).

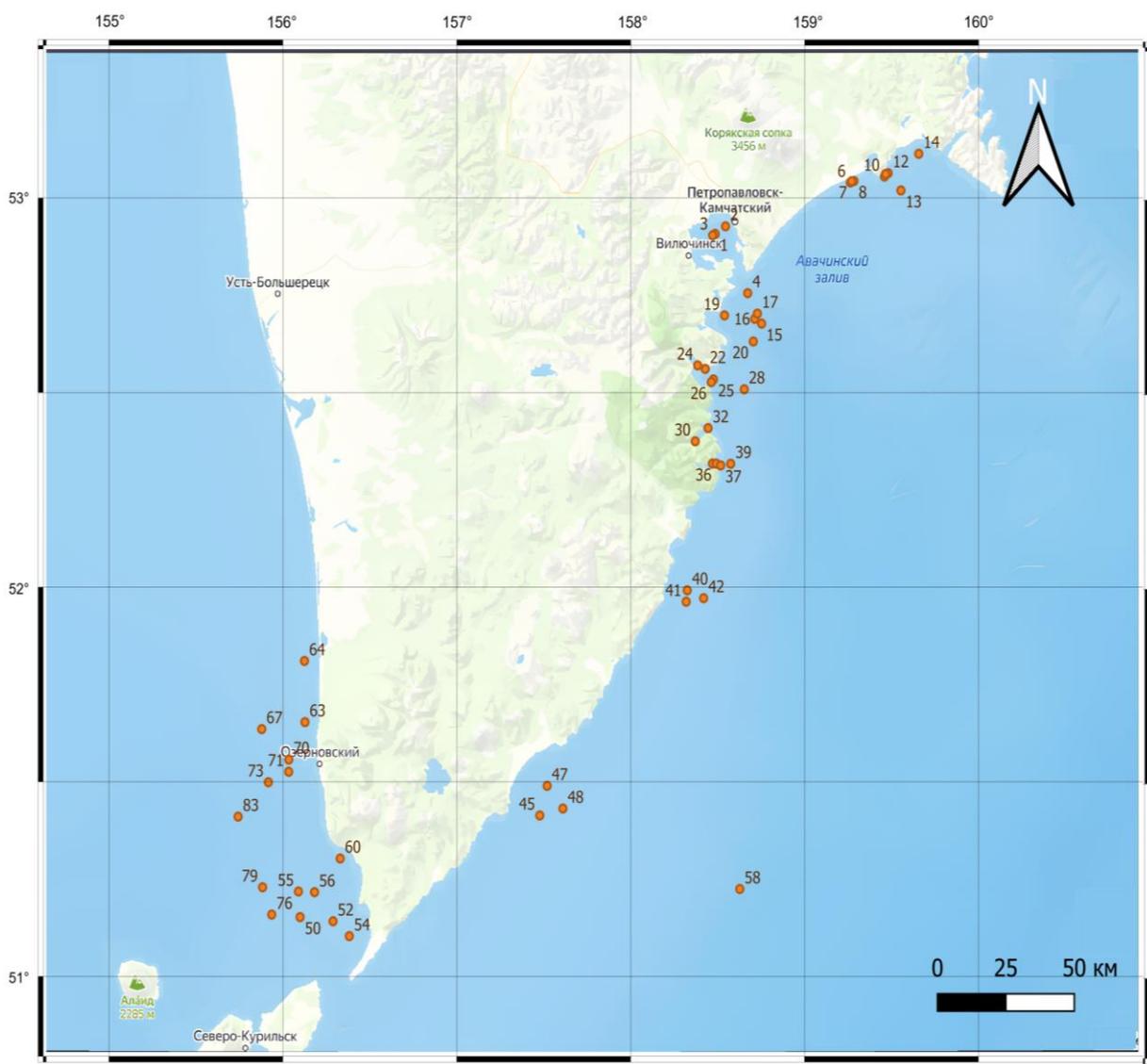


Рис. 1. Район исследования и точки отбора проб

Fig. 1. Study area and sample collection points

Для определения концентрации ВВ в воде пробы воды из поверхностного и придонного горизонтов отбирали при помощи розетки с батометрами. В объеме 1 л фильтровали на установке для вакуумной фильтрации с применением вакуумного насоса, фильтровальной установки и колбы Бунзена. Для отделения взвеси использовались нитроцеллюлозные мембранные фильтры с ячейей 0,45 мкм с заранее известными массами. После окончания процесса фильтрации фильтры высушивали при комнатной температуре, хранили в эксикаторе, для транспортировки в лабораторию упаковывали герметично в zip-пакеты [РД 52.24.468-2019].

Температура, соленость воды и глубина на станциях отбора проб определялись при помощи CTD-зонда Sea-Bird SBE 911plus.

Для построения карт в данной работе были использованы программа QGIS 3.34.11, а также ресурсы платформы NextGIS. Статистическая обработка проводилась стандартными методами в программе Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследуемая территория с точки зрения административного деления охватывает Усть-Большерецкий и Елизовский муниципальные районы Камчатского края, а также города краевого значения: Петропавловск-Камчатский, Елизово и Вилючинск, которые существенно различаются по уровню урбанизации (рис. 2). В Елизовском районе урбанизация достигает 60,6% при плотности населения менее 1,5 чел/км² (без учета городов краевого значения), тогда как в Усть-Большерецком районе плотность составляет лишь около 0,3 чел/км², а городские поселения занимают всего 0,07% площади (населенные пункты Октябрьский и Озерновский значились городскими поселениями лишь до 2009 г.,

но авторами в данной работе будут рассматриваться в числе урбанизированных территорий) [Справочник..., 2024]. Этот контраст подчеркивает различия в характере освоения территорий.

Для оценки пространственного распределения ВВ в прибрежных водах были проанализированы концентрации в поверхностных и придонных горизонтах, а также их вариации между различными акваториями (рис. 3). Концентрация ВВ в поверхностном горизонте в среднем составила 12,07 мг/л (мин. 7,75 мг/л на станции № 2, макс. 33,20 мг/л на станции № 5) с более высокой изменчивостью данных ($\sigma = 3,51$ мг/л), по сравнению с придонным горизонтом, где средняя концентрация ВВ составила 12,16 мг/л (минимальная 9,95 мг/л на станции № 3, максимальная 14,70 мг/л на станции № 6) при меньшей изменчивости ($\sigma = 1,40$ мг/л). В среднем концентрация ВВ в придонном горизонте немного выше, но разница статистически незначительна.

В Охотском море для поверхностного горизонта концентрация ВВ варьировала от 7,75 мг/л на станции № 36 до 33,20 мг/л на станции № 7, со средним значением 12,31 мг/л, медианой 12,20 мг/л и стандартным отклонением 4,15 мг/л. В придонном горизонте минимальная концентрация составила 9,95 мг/л на станции № 35, а максимальная – 14,05 мг/л на станции № 24, при среднем значении 11,95 мг/л, медиане 11,83 мг/л и стандартном отклонении 1,28 мг/л. В Тихом океане для поверхностного горизонта концентрация варьировала от 10,25 мг/л на станции № 15 до 20,45 мг/л на станции № 28, со средним значением 12,56 мг/л, медианой 12,35 мг/л и стандартным отклонением 2,45 мг/л. Для придонного горизонта минимальная концентрация составила 8,75 мг/л на станции № 12, а максимальная – 16,35 мг/л на станции № 19,

при среднем значении 11,25 мг/л, медиане 11,10 мг/л и стандартном отклонении 1,95 мг/л. Статистически значимой раз-

ницы в концентрациях ВВ между акваториями Охотского моря и Тихого океана не выявлено.

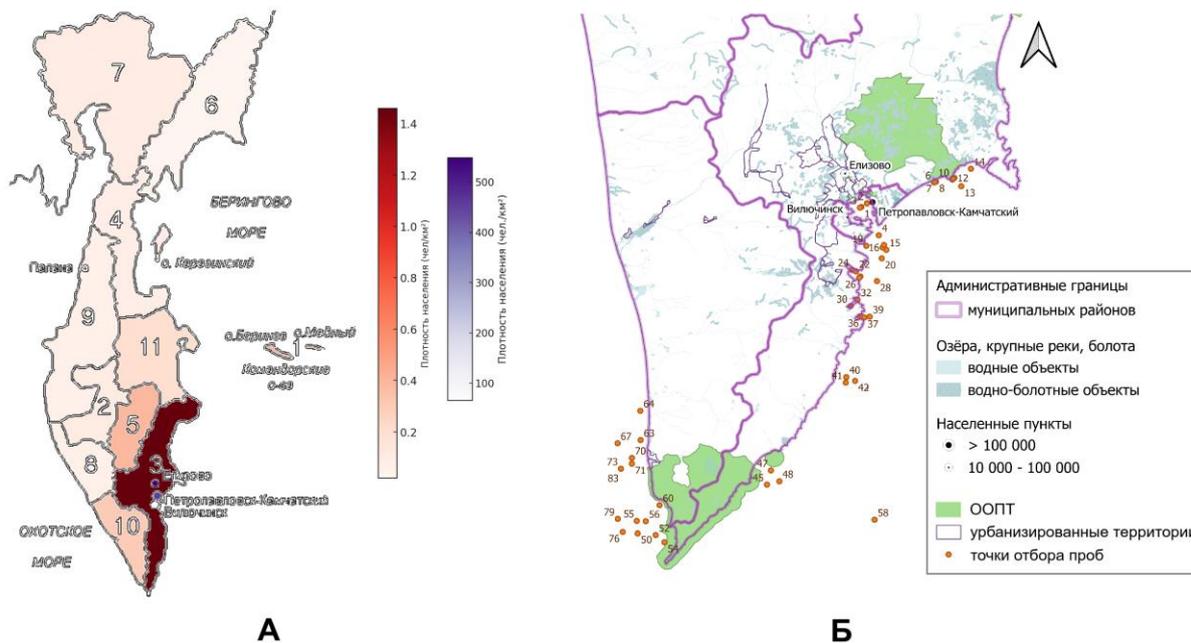


Рис. 2. Схема зонирования территории п-ова Камчатка по степени урбанизации. А: 1 – Алеутский район; 2 – Быстринский район; 3 – Елизовский район; 4 – Карагинский район; 5 – Мильковский район; 6 – Олюторский район; 7 – Пенжинский район; 8 – Соболевский район; 9 – Тигильский район; 10 – Усть-Большерецкий район; 11 – Усть-Камчатский район

Fig. 2. Zoning scheme of the Kamchatka Peninsula territory according to the degree of urbanization. A: 1 – Aleutsky District; 2 – Bystrinsky District; 3 – Yelizovsky District; 4 – Karaginsky District; 5 – Milkovsky District; 6 – Olyutorsky District; 7 – Penzhinsky District; 8 – Sobolevsky District; 9 – Tigil'skiy District; 10 – Ust-Bolsheretsky District; 11 – Ust-Kamchatsky District

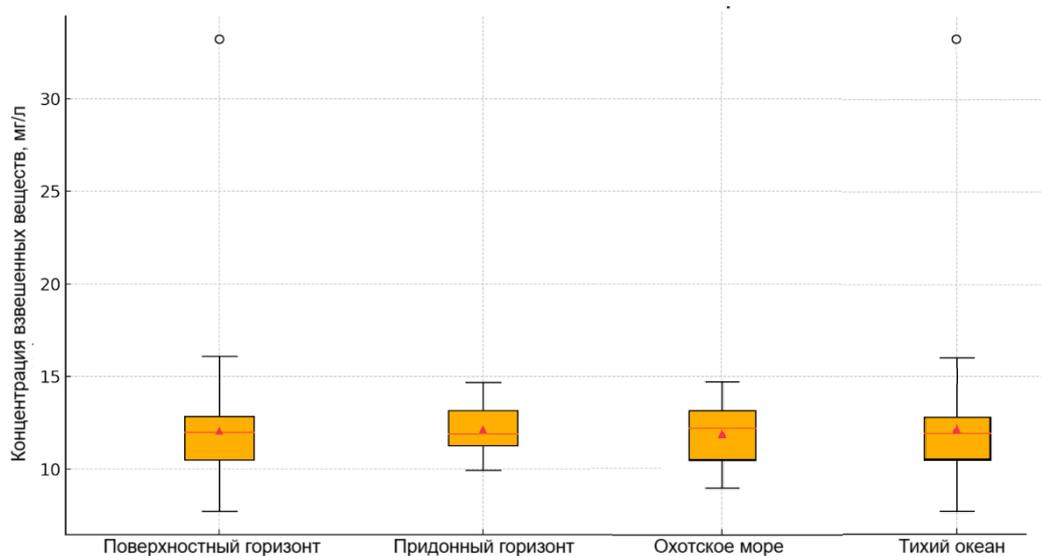


Рис. 3. Распределение концентрации взвешенных веществ по водным горизонтам и акваториям

Fig. 3. Distribution of suspended matter concentrations across water layers and aquatic areas

Процент проб в поверхностном горизонте, где концентрация ВВ превышает ПДК (10 мг/л) (рис. 4), составляет примерно 83,67% [Приказ..., 2016]. На станции № 7 (в районе Халактырского пляжа) зафиксировано превышение ПДК в 3,3 раза. Отметим, что согласно данным ФГБУ «Камчатское УГМС», в 2023 г. в прибрежных водах Авачинской губы и прибрежной части Авачинского залива (район Халактырского пляжа) среднегодовые концентрации ВВ не превышали ПДК. Однако в отдельных пробах, отобранных в августе в поверхностном горизонте в районе Халактырского пляжа, концентрация ВВ превысила ПДК в 1,4 раза, а в сентябре максимальная концентрация ВВ достигла 4,7 ПДК на поверхностном горизонте у входа в бухту Крашенинникова [Обзор..., 2023].

Для того чтобы определить, оказывает ли степень урбанизации побережья влияние на концентрацию ВВ в морской среде, был выполнен регрессионный анализ. Помимо характеристик урбанизации, в исследование включены гидрологические параметры и вклад речного стока. Среди переменных рассматривались температура воды на разных горизонтах, соленость, глубина, расстояние до устья ближайшей

реки, длина реки, площадь ее водосбора, а также расстояние до ближайшего города, численность его населения и площадь.

Результаты анализа показали, что модель объясняет всего 18,2% вариации концентрации ВВ ($R^2 = 0,182$), ее скорректированный коэффициент детерминации (Adjusted $R^2 = 0,062$) указывает на слабую объяснительную способность, а статистическая значимость отсутствует ($p > 0,05$). Среди всех факторов поверхностная температура воды ($\beta = 0,0143$, $p = 0,970$) и придонная температура ($\beta = 0,1179$, $p = 0,640$) продемонстрировали положительные, но крайне слабые связи с концентрацией ВВ. Соленость на поверхности ($\beta = 1,2279$, $p = 0,319$) имеет умеренную положительную связь, тогда как придонная соленость ($\beta = -0,7257$, $p = 0,433$) — слабую отрицательную. Характеристики урбанизации, включая расстояние до города ($\beta = -0,0596$, $p = 0,310$), численность населения ($\beta = -1,732 \times 10^{-5}$, $p = 0,459$) и площадь города ($\beta = 0,0168$, $p = 0,311$), также показали слабую связь с концентрацией ВВ, не достигая статистической значимости. Географические параметры, такие как расстояние до ближайшей реки ($\beta = 0,0472$, $p = 0,444$) и ее длина ($\beta = 0,0211$, $p = 0,513$), также не оказали значительного влияния.

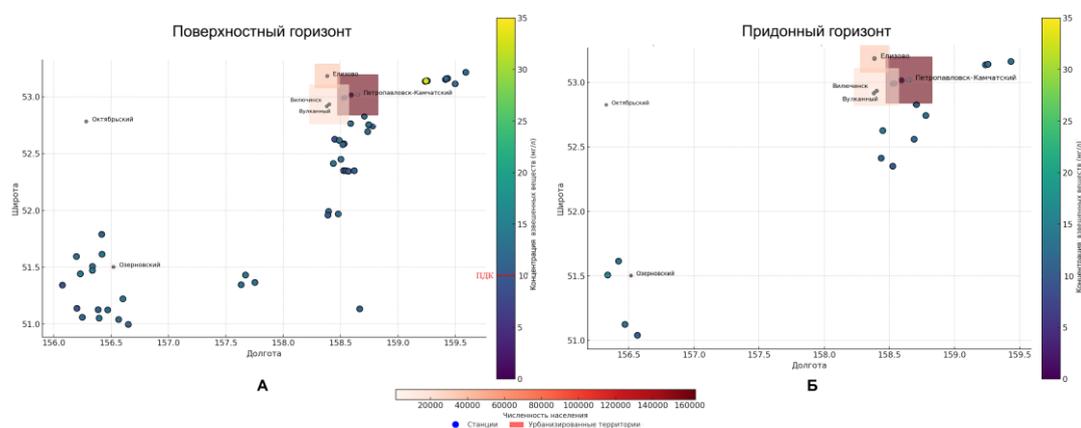


Рис. 4. Концентрации взвешенных веществ в поверхностном (А) и придонном (Б) горизонтах прибрежных акваторий п-ова Камчатка

Fig. 4. Suspended matter concentrations in the surface (A) and bottom (B) layers of the coastal waters of the Kamchatka Peninsula

Корреляционный анализ, однако, выявил слабую положительную связь концентрации ВВ с такими факторами, как площадь ближайшего города ($r = 0,26$) и численность его населения ($r = 0,27$). Среди гидрологических характеристик придонная температура ($r = 0,36$) имеет положительную корреляцию, в то время как придонная соленость ($r = -0,25$) демонстрирует отрицательную. Географические параметры, включая площадь водосбора ближайшей реки ($r = 0,31$), длину реки ($r = 0,27$) и расстояние до реки ($r = -0,18$), показали аналогичные слабые корреляции.

Эти данные указывают на существование слабой положительной корреляции между показателями урбанизации и концентрацией ВВ (наравне с влиянием речного стока). Однако регрессионный анализ демонстрирует, что эти корреляции могут быть обусловлены воздействием дополнительных факторов, что требует дальнейшего изучения.

Для анализа структурных особенностей пространственного распределения концентраций ВВ в прибрежных водах полуострова Камчатка были применены

методы кластерного анализа, включая K-means и иерархическую кластеризацию (Agglomerative Clustering). Результаты анализа выявили четыре кластера как в поверхностном, так и в придонном горизонтах (рис. 5).

В поверхностном горизонте станции, относящиеся к кластеру 0, находятся в непосредственной близости к урбанизированным территориям (среднее расстояние около 28 км). Средняя концентрация ВВ в этом кластере составляет 11,21 мг/л. Кластер 1 также включает станции, расположенные сравнительно недалеко от урбанизированных территорий (около 26 км), однако средняя концентрация здесь выше и достигает 13,43 мг/л. Удаленные станции, входящие в кластер 2, расположены на среднем расстоянии 165 км от урбанизированных зон, при этом концентрация ВВ здесь самая низкая (10,50 мг/л). Напротив, станции, относящиеся к кластеру 3, находятся на значительном удалении (около 123 км), но демонстрируют повышенные значения концентрации ВВ (13,57 мг/л), что, вероятно, связано с природными источниками.

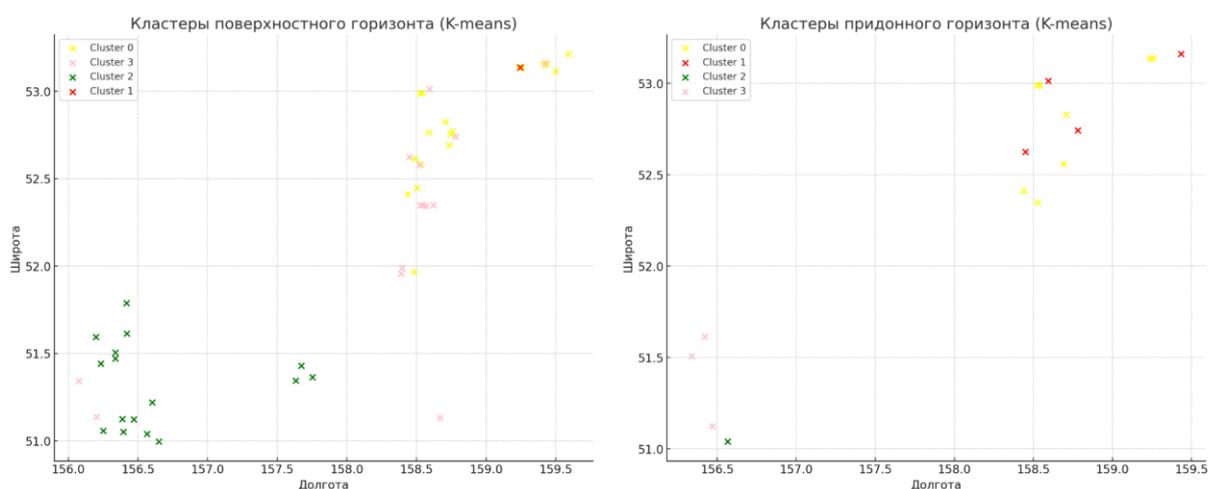


Рис. 5. Результаты кластерного анализа

Fig. 5. Results of cluster analysis

Повышенные средние значения концентрации ВВ в кластерах 1 и 3, вероятно, в большей степени объясняются природными факторами. Повышенное содержание ВВ может быть характерной особенностью прибрежных акваторий Камчатки, обусловленной уникальными природными условиями региона. В литературе неоднократно отмечается, что гидродинамические процессы, активный речной сток, вулканическая деятельность, а также высокая биологическая продуктивность акваторий способствуют значительным концентрациям ВВ в воде. Например, такие особенности, как мощные течения и большое количество впадающих рек, несущих значительные нагрузки взвешенных минеральных и органических веществ, уже упоминались в исследованиях гидрологии и океанографии региона [Отчет..., 2012]. Кроме того, влияние вулканических процессов, которые могут увеличивать содержание минеральных частиц в воде, также характерно для Камчатского региона [Природные..., 2023]. Таким образом, даже в удаленных от антропогенного воздействия зонах здесь фиксируются относительно высокие уровни ВВ [Прибрежные..., 2005]. При сравнении кластеров 0 (у восточного побережья Камчатки, вблизи крупных урбанизированных центров) и 2 (у западного побережья и восточного побережья вблизи ООПТ), которые включают большинство станций и характеризуются низкой внутрикластерной вариативностью, достоверно более высокая концентрация ВВ наблюдается в кластере 0. Это позволяет предположить, что близость к урбанизированным территориям оказывает влияние на концентрацию ВВ.

Дополнительный анализ показал взаимосвязь между кластерами и численностью населения ближайших урбанизированных территорий. Для поверхностного

горизонта станции кластеров 0 и 1, расположенные ближе к урбанизированным зонам с высокой численностью населения (в среднем 68,944 и 90,964 человека соответственно), характеризуются более высокими значениями концентрации ВВ. В то же время кластеры 2 и 3 ассоциируются с территориями с низким уровнем урбанизации и малочисленным населением (в среднем 1,587 человека), где концентрация ВВ значительно ниже. Придонный горизонт демонстрирует аналогичную тенденцию: кластеры, связанные с крупными урбанизированными центрами (0 и 1), имеют повышенные значения концентрации ВВ, тогда как кластеры 2 и 3, расположенные в удаленных районах с минимальным влиянием урбанизации, характеризуются меньшими концентрациями.

Кластерный анализ подтвердил, что станции, расположенные ближе к урбанизированным зонам, имеют тенденцию к более высоким значениям концентрации ВВ. Однако выявленные высокие значения концентрации ВВ в удаленных районах свидетельствуют о значительном влиянии природных факторов, таких как гидродинамические процессы, речной сток и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование содержания взвешенных веществ в прибрежных акваториях полуострова Камчатка, проведенное на различных глубинах и в акваториях с разной степенью урбанизации, позволило выявить основные тенденции и закономерности распределения. Концентрации ВВ варьируют как в поверхностных, так и в придонных горизонтах, причем в среднем показатели в поверхностном слое выше. Однако статистически значимых различий между акваториями Охотского моря и Тихого океана не выявлено, что указывает

на отсутствие влияния океанографических условий как определяющего фактора.

Повышенные концентрации ВВ наблюдаются в зонах, прилегающих к урбанизированным территориям, что подтверждается результатами кластерного анализа. Однако выявленные положительные корреляции между степенью урбанизации и концентрациями ВВ остаются слабыми и статистически незначимыми, что свидетельствует о сложной структуре факторов влияния. Даже в удаленных от антропогенных воздействий районах наблюдаются значительные концентрации ВВ, что связано с природными источниками, такими как речной сток и гидродинамические процессы. Они требуют дальнейшего изучения для оценки их вклада в общее содержание взвеси.

Использование многофакторного анализа и методов кластеризации позволило получить детализированные данные, однако низкий коэффициент детерминации моделей указывает на необходимость дальнейшего улучшения методов анализа. Для повышения точности моделей желательно учитывать более широкий спектр экологических и гидрологических данных, а также сезонные изменения, которые могут существенно влиять на концентрации ВВ. Полученные данные важны для понимания влияния антропогенных и природных факторов на состояние прибрежных экосистем Камчатки, однако требуют дополнительных исследований для формирования более полной картины.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ «Изучение биогеохимических закономерностей радиоэкологических и хемозкологических процессов в экосистемах водоемов Азово-Чер-

номорского бассейна в сравнении с другими акваториями Мирового океана и отдельными водными экосистемами их водосборных бассейнов для обеспечения устойчивого развития на южных морях России» (регистрационный номер: 124030100127-7). Отбор проб осуществлен при поддержке научно-образовательной программы «Плавучий университет» (соглашение № 075-01593-23-06).

ЛИТЕРАТУРА

- Беляева О.И. 2012. О загрязнении ливневых стоков, поступающих в прибрежную зону Черного моря (обзор). *Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия: География*. Т. 25 (64). № 2. С. 20–27.
- Драчев С.М. 1941. Влияние взвешенных веществ на санитарное состояние водоемов. *Гигиена и санитария*. № 4. С. 15–20.
- Кашутин А.Н., Егорова Е.В., Кашутина И.А., Рогалева Н.Л. 2020. Влияние антропогенного загрязнения на водоросли-макрофиты Авачинской губы (Юго-Восточная Камчатка). *Экосистемы*. № 24. С. 130–141.
- Китаев А.Л. 1997. Очистка поверхностного стока с территорий городов. *Водоснабжение и санитарная техника*. № 2. С. 20–21.
- Курочкина В.А., Богомолова Т.Г., Киров Б.Л. 2013. Антропогенная нагрузка на реки урбанизированных территорий. *Гидротехническое строительство*. № 3. С. 25–29.
- Обзор состояния загрязнения окружающей среды по результатам наблюдений ГНС ФГБУ «Камчатское УГМС». 2023. URL: <https://kammeteo.ru/obzor/cms-god.pdf> (дата обращения: 23.01.2025).

- Отчет о выполнении работ для государственных нужд. Разработка проекта СКИОВО, включая НДВ, бассейна реки Камчатка. 2012. ФГУП РосНИИВХ. Отв. исполн. Н.Н. Бортиню. Под ред. Н.Б. Прохоровой. Екатеринбург. 241 с. URL: https://amurbvu.ru/files/SKIOVO_KAMCHATKA.pdf. (дата обращения: 20.01.2025).
- Прибрежные гидробиологические исследования. 2005. *Труды ВНИРО*. Отв. ред. М.В. Переладов. Москва: Изд-во ВНИРО. Т. 144. 317 с.
- Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13 декабря 2016 г. № 552 «Об утверждении нормативов допустимого воздействия на водные объекты». URL: <https://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201701160006> (дата обращения: 23.01.2025).
- Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование. *Материалы XIV Национальной (всероссийской) научно-практической конференции (21–22 марта 2023 г.)*. Отв. за вып. Е.Г. Лобков. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2023. ISBN 978-5-328-00428-2.
- РД 52.24.468-2019. 2020. Массовая концентрация взвешенных веществ и сухого остатка в водах. Методика измерений гравиметрическим методом. Ростов-на-Дону: Росгидромет. 17 с.
- Справочник административно-территориального устройства Камчатского края. АТУ по состоянию на 01.08.2024. Официальный портал Правительства Камчатского края. URL: https://kamgov.ru/minter/current_activities/spravocnik-administrativno-territorialnogo-ustrojstva (дата обращения: 22.01.2025).
- Федорова Е.В., Карпунина О.П., Максимчук Н.С. 2011. Учет загрязнения водных объектов стоком с городов в схемах комплексного использования и охраны водных объектов. *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. № 2. С. 21–29.
- Чалов С.Р., Цыпленков А.С., Школьный Д.И. и др. 2022. К оценке возможного влияния материкового стока на гибель гидробионтов в Авачинском заливе Тихого океана (Камчатка). *Известия Русского географического общества*. Т. 154. № 4. С. 69–84. DOI: 10.31857/S0869607122040048.
- Чалов С.Р., Леман В.Н. 2019. Региональный подход к рыбохозяйственному нормированию содержания взвешенных веществ. *ВХР*. № 6. С. 66–83.
- Valette-Silver N.J., Hameedi M.J., Efurud D.W., Robertson A. 1999. Sediment Contaminant Concentrations in Estuarine and Coastal Marine Waters of the United States: A Potential Indicator of Sediment Quality. NOAA Technical Memorandum NOS ORCA 71. 215 p.
- Wang F., Wang X., He L. et al. 2022. Spatial and Temporal Dynamics of Suspended Sediment Concentrations in the Southwest Coast of Sarawak, Borneo. *Biogeosciences*. Vol. 19. № 11. P. 5837–5852.
- Zhang Y., He Y., Zhang B. et al. 2023. Estimating Vertical Distribution of Total Suspended Matter in Coastal Waters Using Remote Sensing: A Case Study in the Bohai Sea and Yellow Sea. *Remote Sensing*. Vol. 15. № 23. Article № 5559.

REFERENCES

- Belyaeva O.I. 2012. On the pollution of storm water flowing into the coastal zone of the Black Sea (overview). *Uchenye zapiski Tavricheskogo nacional'nogo universiteta im. V.I. Vernadskogo. Seriya Geografiya (Scientific notes of V.I. Vernadsky Tauride*

- National University. Geography series*. Vol. 25 (64). № 2. P. 20–27 (in Russian).
- Drachev S.M. 1941. The influence of suspended substances on the sanitary condition of water bodies. *Gigiena i sanitariya (Hygiene and Sanitation)*. № 4. P. 15–20 (in Russian).
- Kashutin A.N., Egorova E.V., Kashutina I.A., Rogaleva N.L. 2020. The impact of anthropogenic pollution on macroalgae in Avacha Bay (Southeastern Kamchatka). *Ekosistemy (Ecosystems)*. № 24. P. 130–141 (in Russian).
- Kitaev A.L. 1997. Purification of surface runoff from urban areas. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika (Water Supply and Sanitary Engineering)*. № 2. P. 20–21 (in Russian).
- Kurochkina V.A., Bogomolova T.G., Kirov B.L. 2013. Anthropogenic load on rivers in urbanized areas. *Gidrotekhnicheskoe stroitelstvo (Hydraulic Engineering)*. № 3. P. 25–29 (in Russian).
- Review of environmental pollution based on observations of the State Observation Network of the Kamchatka Hydrometeorological Service. 2023. URL: <https://kammeteo.ru/obzor/cms-god.pdf> (accessed: 23.01.2025) (in Russian).
- Report on the implementation of works for state needs. Development of the SKIOVO project, including NDV, for the Kamchatka River Basin. 2012. FSUE RosNIIVKh. Responsible executor N.N. Bortin. Edited by N.B. Prokhorova. Ekaterinburg, 241 p. URL: https://amurbvu.ru/files/SKIOVO_KAMCHATKA.pdf (accessed: 20.01.2025) (in Russian).
- Coastal hydrobiological investigations. 2005. *Trudy VNIRO (Proceedings VNIRO)*. Editor-in-Chief M.V. Pereladov. Moscow: VNIRO Publ. V. 144. 317 p. (in Russian)
- Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation dated December 13, 2016 № 552 “On approval of standards for permissible impact on water bodies”. URL: <https://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201701160006> (accessed: 23.01.2025) (in Russian).
- Proceedings of the XIV National (All-Russian) scientific and practical conference “Natural resources, their present condition, protection, industrial and technical use”* (March 21–22, 2023). Resp. for the issue E.G. Lobkov. Petropavlovsk-Kamchatsky: KamchatSTU Publ. 2023. ISBN 978-5-328-00428-2 (in Russian).
- RD 52.24.468-2019. 2020. Mass concentration of suspended solids and dry residue in water. Measurement practice by gravimetric method. Rostov-on-Don: Roshydromet Publ. 17 p. (in Russian).
- Handbook of the administrative-territorial structure of the Kamchatka Territory. Administrative-territorial units as of 01.08.2024. Official portal of the Government of the Kamchatka Territory. URL: https://kamgov.ru/minter/current_activities/spravocnik-administrativno-territorialnogo-ustrojstva (accessed: 22.01.2025) (in Russian).
- Fedorova E.V., Karpunina O.P., Maksimchuk N.S. 2011. Accounting for pollution of water bodies by urban runoff in schemes for the integrated use and protection of water resources. *Vodnoe hozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie (Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management)*. № 2. P. 21–29 (in Russian).
- Chalov S.R., Tsyplenkov A.S., Shkolny D.I. et al. 2022. On the assessment of the possible impact of continental runoff on the death of aquatic organisms in Avacha Bay of the Pacific Ocean (Kamchatka). *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva (Proceedings of the Russian Geographical Society)*. Vol. 154. № 4.

- P. 69–84. DOI: 10.31857/S0869607122040048 (in Russian).
- Chalov S.R., Leman V.N. 2019. Regional approach to fishery regulation of suspended solids content. *Vodnoe hozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie (Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management)*. № 6. P. 66–83 (in Russian).
- Valette-Silver N.J., Hameedi M.J., Efur D.W., Robertson A. 1999. Sediment Contaminant Concentrations in Estuarine and Coastal Marine Waters of the United States: A Potential Indicator of Sediment Quality. NOAA Technical Memorandum NOS ORCA 71. 215 p.
- Wang F., Wang X., He L. et al. 2022. Spatial and Temporal Dynamics of Suspended Sediment Concentrations in the Southwest Coast of Sarawak, Borneo. *Biogeosciences*. Vol. 19. № 11. P. 5837–5852.
- Zhang Y., He Y., Zhang B. et al. 2023. Estimating Vertical Distribution of Total Suspended Matter in Coastal Waters Using Remote Sensing: A Case Study in the Bohai Sea and Yellow Sea. *Remote Sensing*. Vol. 15. № 23. Article № 5559.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Зарипова Ксения Маратовна – Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН; 299011, Россия, Севастополь; младший научный сотрудник; km.zaripova@mail.ru. SPIN-код: 4535-0790, Author ID: 1080936; Scopus ID: 59173430600.

Zaripova Ksenia Maratovna – A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS; 299011, Russia, Sevastopol; Junior Researcher; km.zaripova@mail.ru. SPIN-code: 4535-0790, Author ID: 1080936; Scopus ID: 59173430600.

Тихонова Елена Андреевна – Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН; 299011, Россия, Севастополь; кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель лаборатории хемэкологии; tihonova@mail.ru. SPIN-код: 3786-7334, Author ID: 844103; Scopus ID: 57208495804.

Tikhonova Elena Andreevna – A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS; 299011, Russia, Sevastopol; Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, Head of the Chemoecology Laboratory; tihonova@mail.ru. SPIN-code: 3786-7334, Author ID: 844103; Scopus ID: 57208495804.

Статья поступила в редакцию 07.02.2025; одобрена после рецензирования 05.03.2025; статья принята к публикации 20.03.2025.

The article was submitted 07.02.2025; approved after reviewing 05.03.2025; accepted for publication 20.03.2025.

Для цитирования: Зарипова К.М., Тихонова Е.А. 2025. Распределение взвешенных веществ в прибрежных акваториях полуострова Камчатка. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. Вып. 71. С. 108–119. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2025-71-108-119>.

For citation: Zaripova K.M., Tikhonova E.A. 2025. Distribution of suspended matter in the coastal waters of the Kamchatka Peninsula. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta (Bulletin of Kamchatka State Technical University)*. Iss. 71. P. 108–119 (in Russian). <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2025-71-108-119>.

ПРАВИЛА НАПРАВЛЕНИЯ, РЕЦЕНЗИРОВАНИЯ И ОПУБЛИКОВАНИЯ РУКОПИСЕЙ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ В НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ВЕСТНИК КАМЧАТГТУ»

Журнал «Вестник КамчатГТУ» выпускается четыре раза в год и публикует результаты научных исследований по направлениям:

- 1.5.12. Зоология (биологические науки)
- 1.5.15. Экология (биологические науки)
- 1.5.16. Гидробиология (биологические науки)
- 1.5.20. Биологические ресурсы (биологические науки)
- 2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки)
- 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки)
- 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы (физико-математические науки)
- 4.3.3. Пищевые системы (биологические и технические науки)
- 4.3.5. Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ (технические науки)

В рамках общих направлений предпочтения отдается следующим профилям:

- научно-информационное обеспечение развития технических систем, контроля природной среды и использования природных ресурсов;
- аквакультура и охрана водных биологических ресурсов и среды их обитания, воздействие природных и антропогенных факторов на состояние водных экосистем;
- пищевые технологии и рыбоперерабатывающая техника.

Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не соответствующие профилю журнала.

В журнале печатаются результаты, ранее не опубликованные и не предназначенные к одновременной публикации в других изданиях.

Работа должна соответствовать указанным выше направлениям, обладать несомненной новизной, иметь теоретическую и практическую значимость. Рукописи статей должны быть подготовлены на высоком научном уровне и содержать результаты исследований по соответствующей проблематике. Материалы исследований, присланные в журнал, не должны содержать заимствований из работ, принадлежащих другим ученым. Ссылки на исследования других специалистов даются в порядке, определенном традициями научного сообщества.

Рукописи должны быть оформлены в соответствии с правилами оформления, принятыми в журнале. Журнал публикует статьи на русском и английском языках.

Направление рукописей

Рукописи статей в электронном виде направляются в редакцию журнала по адресу: vestnik@kamchatgtu.ru. Название файла должно содержать фамилию автора статьи.

К рукописи статьи в электронном виде (скан-копии) должны быть приложены:

- анкета-заявка на опубликование. Если у статьи несколько авторов, то сведения предоставляются полностью о каждом из них, указывается автор для переписки с редакцией (Приложение 1);

- согласие автора о передаче права на публикацию рукописи и распространение в российских и международных электронных базах данных (Приложение 2);
- согласие автора на обработку и передачу персональных данных (Приложение 3);
- акт экспертизы / экспертное заключение в форме, принятой в направляющей организации;
- разрешение на опубликование материалов от организации, в которой работает автор с подписью руководителя и печатью организации (для внешних авторов).

Рецензирование рукописей

Издание осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, соответствующих ее тематике, с целью их экспертной оценки. Статьи, присланные в журнал, проходят предварительное (общий допуск) и профильное (официальная рецензия) рецензирование. Вопрос об опубликовании рукописи, ее отклонении решает редакционная коллегия журнала.

Рецензентами журнала являются высококвалифицированные специалисты, имеющие степень доктора или кандидата наук и научные публикации в областях наук по профилю рецензирования.

Рукопись, получившая положительную оценку рецензентов, принимается к опубликованию в журнале на заседании редколлегии журнала.

Рукопись, получившая рекомендации по доработке, отправляется авторам. Исправленная рукопись проходит повторное рецензирование.

В случае получения отрицательной рецензии на рукопись автор получает мотивированный отказ в опубликовании. Решение редколлегии о принятии статьи к печати или ее отклонении сообщается авторам.

Редколлегия оставляет за собой право отклонить материал без указания причин. Отклоненные рукописи авторам не возвращаются.

Рецензии хранятся в редакции журнала в течение 5 лет. При поступлении в редакцию соответствующего запроса редакция издания направляет копии рецензий в Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Опубликование рукописей

Каждый номер научного журнала комплектуется из рукописей статей, прошедших рецензирование и принятых к опубликованию решением редакционной коллегии с учетом очередности поступления рукописи, ее объема и наполненности разделов.

Преимущественное право на публикацию имеют сотрудники КамчатГТУ, аспиранты, завершающие обучение в аспирантуре, и лица, выходящие на защиту диссертации в ближайшее время.

Автор может опубликовать в одном номере журнала не более одной статьи в качестве единственного автора.

Плата за публикации рукописей не взимается. Гонорар за публикации не выплачивается.

Полнотекстовые электронные версии выпусков журналов размещаются на сайте КамчатГТУ (<http://www.kamchatgtu.ru>), в Научной электронной библиотеке (НЭБ) (<http://elibrary.ru>).

Печатная версия журнала высылается по всем обязательным адресам рассылки.

Аннотации всех публикуемых материалов, ключевые слова, информация об авторах размещаются в свободном доступе на сайте журнала, в электронных системах цитирования (базах данных) на русском и английском языках.

Приложение 1

Анкета-заявка

Полные Ф. И. О.	На русском и английском языках
Название статьи	На русском и английском языках
Ученая степень	На русском и английском языках
Ученое звание	На русском и английском языках
Должность (с указанием структурного подразделения)	На русском и английском языках
Место работы	На русском и английском языках
Адрес места работы (обязательно указать индекс)	На русском и английском языках
Членство в академиях (РАЕН, РАН, МАНЭБ, Военная и др.)	На русском и английском языках
Номера телефонов (мобильный, служебный, домашний)	
Адрес электронной почты (e-mail)	

Приложение 2

Согласие автора

**о передаче права на публикацию рукописи в научном журнале
«Вестник Камчатского государственного технического университета»
и распространение в российских и международных электронных базах данных**

Я, нижеподписавшийся, _____
(Ф. И. О. автора)

автор рукописи _____

(название рукописи)

передаю на безвозмездной основе редакции научного журнала «**Вестник Камчатского государственного технического университета**» неисключительное право на опубликование этой рукописи статьи (далее – Произведение) в печатной и электронной версиях научного журнала «**Вестник Камчатского государственного технического университета**», а также на распространение Произведения путем размещения его электронной копии в базе данных «Научная электронная библиотека» («НЭБ»), представленной в виде информационного ресурса сети Интернет elibrary.ru. Территория, на которой допускается использование вышеуказанных прав на Произведение, не ограничена.

Я подтверждаю, что указанное Произведение нигде ранее не было опубликовано.

Я подтверждаю, что данная публикация не нарушает авторские права других лиц или организаций.

С правилами представления статей в редакцию научного журнала «**Вестник Камчатского государственного технического университета**» согласен / согласна.

наименование
организации

должность

дата

подпись

расшифровка
подписи

**Согласие на публикацию
и обработку персональных данных
авторов научного журнала Вестник КамчатГТУ**

Я, _____, в соответствии с требованиями статьи 9 Федерального закона от 27.07.2006 г. № 152-ФЗ «О персональных данных» даю согласие на обработку моих персональных данных издателю – ФГБОУ ВО «КамчатГТУ», расположенному по адресу: 683003, Камчатский край, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, д. 35, ИНН 4100001140, ОГРН 1024101031790, в рамках процесса опубликования моей статьи в научном журнале «Вестник КамчатГТУ». Представленная статья не публиковалась ранее в других изданиях и не находится на рассмотрении в редакциях других издательств. Все возможные конфликты интересов, связанные с авторскими правами и опубликованием рассматриваемой статьи, урегулированы. Публикация статьи не нарушает авторские права третьих лиц.

Подтверждаю свое согласие на опубликование и размещение полнотекстовой версии статьи и своих персональных данных (фамилия, имя, отчество; сведения о месте работы и занимаемой должности; учёная степень (учёное звание); электронная почта, контактный телефон и другие предоставляемые мной в рамках статьи данные) в открытом доступе на сайте ФГБОУ ВО «КамчатГТУ» (www.kamchatgtu.ru), Научной электронной библиотеки (www.elibrary.ru), в иных базах данных научной информации, электронно-библиотечных системах, научных информационных ресурсах в сети Интернет и доведения до всеобщего сведения, обработки и систематизации в других базах цитирования, а также для включения в аналитические и статистические отчетности без ограничения по сроку.

(подпись)

(Ф. И. О. автора)

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ СТАТЕЙ

Объем

Объем содержательной части рукописи статьи (введение, материалы и методы, результаты и обсуждение, заключение) – не менее 5 страниц (без учёта таблиц, рисунков и списка литературы) для оригинальных статей и не более 24 страниц – для статей-ревизий.

Рекомендуемая структура

Статья должна быть структурирована и включать следующие разделы: введение, материалы и методы, результаты и обсуждение, заключение, литература.

Правила набора

Текстовый редактор – Microsoft Word, шрифт – Times New Roman; размер шрифта: основной – 11,5, вспомогательный – 10,5; абзацный отступ – 0,7 см; междустрочный интервал (множитель) – 1,2. Поля: верхнее – 20 мм, нижнее – 20 мм, правое – 20 мм, левое – 20 мм.

Начало статьи

Через один междустрочный интервал последовательно приводятся следующие сведения:

– индекс универсальной десятичной классификации (УДК), выровненный влево (шрифт 11,5);

на русском языке указываются:

– название статьи прописными (заглавными) полужирными буквами, без переносов, с выравниванием по центру (шрифт 11,5; междустрочный интервал – 1);

– фамилии и инициалы авторов последовательно с выравниванием по левому краю без абзацного отступа (шрифт 11,5; междустрочный интервал – 1);

– название организации, в которой работают авторы, адрес организации (с выравниванием по ширине полосы без абзацного отступа, шрифт 11,5; междустрочный интервал – 1);

– текст краткой аннотации (не менее 75 и не более 120 слов), выровненный по ширине полосы без абзацного отступа (шрифт 10,5; междустрочный интервал – 1); аннотация должна содержать краткое изложение проблемы, указание на технологию или методы исследования, результаты исследования с акцентом на их новизну;

– ключевые слова (не более 10 слов), выровненные по ширине полосы без абзацного отступа (шрифт 10,5; междустрочный интервал – 1);

далее на английском языке через один междустрочный интервал указываются:

– название статьи прописными (заглавными) полужирными буквами, без переносов, с выравниванием по центру (шрифт 11,5; междустрочный интервал – 1);

– фамилии и инициалы авторов последовательно с выравниванием по левому краю без абзацного отступа (шрифт 11,5; междустрочный интервал – 1);

– название организации, в которой работают авторы, адрес организации (с выравниванием по ширине полосы без абзацного отступа, шрифт 11,5; междустрочный интервал – 1);

– текст краткой аннотации, выровненный по ширине полосы без абзацного отступа (шрифт 10,5; междустрочный интервал – 1);

– ключевые слова (не более 10 слов), выровненные по ширине полосы без абзацного отступа (шрифт 10,5; междустрочный интервал – 1).

УДК

**ДЕСТРУКЦИЯ ТКАНЕЙ БУРОЙ ВОДОРΟΣЛИ *SACCHARINA BONGARDIANA*
В ПРОЦЕССЕ ТЕРМОЩЕЛОЧНОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ БИОГЕЛЯ**

Иванов А.А.¹, Петрова А.А.²

¹ Камчатский государственный технический университет, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35.

² Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, г. Москва, ул. Красносельская, 17.

Saccharina bongardiana – один из самых массовых видов ламинариевых водорослей камчатского шельфа, характеризующийся широкой экологической пластичностью и морфологической изменчивостью. В работе описаны отличия его морфогенеза и биологии развития от таковых у других камчатских представителей рода *Saccharina* и близкого к нему рода *Laminaria*, рассмотрены особенности внутреннего строения, позволяющие данному виду осваивать литоральную зону шельфа, противостоять воздействию неблагоприятных факторов. Описан разработанный авторами метод контроля процесса деструкции тканей, происходящий под воздействием термощелочной обработки в процессе получения биогеля из этого вида водорослей.

Ключевые слова: *Saccharina bongardiana*, биология развития, морфогенез, водорослевый биогель, термощелочная обработка, деструкция ткани.

**TISSUE DESTRUCTION IN THE BROWN ALGA, *SACCHARINA BONGARDIANA*,
DURING THE PROCESS OF THERMAL-ALKALIN TREATMENT
WHEN PRODUCING BIOGEL**

Ivanov A.A.¹, Petrova A.A.²

¹ Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Klyuchevskaya Str. 35.

² Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Moscow, Krasnoselskaya Str. 17.

Saccharina bongardiana is one of the most widespread kelp species in Kamchatka, which is characterized by a broad ecological plasticity and morphological variability. We describe differences in its morphogenesis and developmental biology from the other *Saccharina* and *Laminaria* species from Kamchatka, and features of its internal structure that allow this species to develop in the tidal zone and withstand the effects of adverse environmental factors. The method developed by the authors to control the process of *S. bongardiana* tissue destruction occurring in the process of thermo-alkaline treatment when producing biogel from this alga is described.

Key words: *Saccharina bongardiana*, developmental biology, morphogenesis, algal biogel, thermo-alkaline treatment, tissue destruction.

Текст статьи

Основной размер шрифта текста статьи – 11,5; междустрочный интервал (множитель) – 1,2; абзацный отступ – 0,7 см.

Структурные элементы статьи (**введение, материалы и методы, результаты и обсуждение, заключение, литература**) должны быть приведены прописными (заглавными) полужирными буквами с выравниванием по центру.

Ссылки на литературу в тексте должны быть приведены в квадратных скобках с указанием фамилии автора (-ов) и через запятую – года выпуска научного издания (в порядке возрастания года издания; например, [Иванов, 1974; Петров, 1995; Абрамов, 2010]).

Ссылки на рисунки и таблицы должны быть приведены в тексте, при этом сами рисунки и таблицы – в конце статьи (после литературы и информации об авторах) с обязательным переводом названий таблиц и подрисуночных подписей на английский язык.

Все рисунки, кроме единственного, нумеруются. Рисунки должны быть четкими, обозначения и надписи читаемыми. Номер рисунка и подпись к нему печатаются шрифтом 10,5 размера, междустрочный интервал – 1 с выравниванием по ширине полосы без абзацного отступа (выносятся отдельно от рисунка для возможности редактирования). **Дополнительно к комплекту документов должны быть приложены файлы рисунков в формате jpg с разрешением не менее 300 dpi.**

Все таблицы, кроме единственной, нумеруются. Номер таблицы и подпись к нему печатаются 10,5 шрифтом, междустрочный интервал – 1 с выравниванием по ширине полосы без абзацного отступа.

Математические, физические и химические формулы следует набирать в редакторе Microsoft Equation Editor. Все формулы, на которые есть ссылки в тексте, нумеруются, и ссылки на них приводятся в круглых скобках. Формулы выносятся отдельной строкой. Номер формулы вводится в круглые скобки и выравнивается по правому краю.

Образец оформления текста статьи

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время известно, что бурые, главным образом ламинариевые водоросли являются источником получения веществ [Ковалева, 2000; Липатов, 2004; Разумов и др., 2004; Талабаева, 2006; Конева, 2009; Вафина, 2010].

.....

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

.....

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Внутреннее строение *S. bongardiana* подвержено (рис. 1).

.....

Описанная выше последовательность мацерации тканей *S. bongardiana* показана на рисунке 2.

Представленная таблица показывает стадии процесса деструкции

.....

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показывает, что

Образец оформления формул

Полученные из опыта значения коэффициентов передач по каждому из каналов $K1(y_j)$ и $K2(y_j)$ соответственно удовлетворяют неравенствам:

$$\begin{aligned} -1 \leq K1(y_j) \leq 1, \\ -1 \leq K2(y_j) \leq 1. \end{aligned} \tag{1}$$

Учитывая более жесткие ограничения (1), получим систему неравенств:

$$\begin{aligned} K1(y_j \text{ min}) \leq K1(y_j) \leq K1(y_j \text{ max}), \\ K1(y_j \text{ min}) \leq K1(y_j) \leq K1(y_j \text{ max}). \end{aligned} \quad (2)$$

При построении семейства характеристик $K1_j = f(K2_j)$ учет неравенств (9) приведет к ограничению изобарных кривых с обеих сторон и выделению отрезков кривых, пересекающихся в исходной рабочей точке, соответствующей номинальным значениям $y_j^H(x)$.

Оформление литературы

Список литературы приводится последовательно на русском и английском языках и оформляется по алфавиту **строго в соответствии с образцом, представленным ниже, с выступом 0,7 см без нумерации.**

Образец оформления литературы

ЛИТЕРАТУРА

- Алфимов Н.Н., Петров Ю.Е. 1972. О биологических и биохимических особенностях некоторых ламинариевых и фукусовых водорослей (Phaeophyta) острова Беринга (Командорские острова). *Ботанический журнал*. Т. 57. № 6. С. 697–700.
- Аминина Н.М., Ключкова Н.Г. 2002. Перспективы развития производства по переработке водорослей на побережье Камчатки. *Рыболовство России*. № 1. С. 54–56.
- Богданов В.Д., Сафронова Т.М. 1993. Структурообразователи и рыбные композиции. Москва: ВНИРО. 172 с.
- Вафина Л.Х. 2010. Обоснование комплексной технологии переработки бурых водорослей (Phaeophyta) при получении функциональных пищевых продуктов. *Диссертация ... канд. техн. наук*. М. 280 с.
- Вишневская Т.Н., Саяпина Т.А., Аминина Н.М. 1999. Химический состав и перспективы использования экстрактов из бурых водорослей. *Тезисы докладов Российской научной конференции «Новые биомедицинские технологии с использованием биологически активных добавок»*. Владивосток. С. 10–12.
- Вялков А.Н., Козлов В.К., Бобровницкий А.И., Михайлов В.И., Подкорытова А.В., Одионец А.Г., Супрун С.В., Тулупов А.М. 2008. Морские водоросли в восстановительной медицине, комплексной терапии заболеваний с нарушением метаболизма. Москва: МДВ. 156 с.
- Зацепина А.Н., Бессонова А.Д. 2016. Обоснование технологии получения продуктов из бурых водорослей. *Материалы Национальной (всероссийской) научно-практической конференции «Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промышленное и техническое использование»*. С. 115–119.
- Иванюшина Е.А., Жигадлова Г.Г. 1994. Биология ламинарии *Laminaria bongardiana* на литорали острова Беринга (Командорские острова). *Биология моря*. Т. 20. № 5. С. 374–380.
- Огородников В.С. 2007. Водоросли-макрофиты Северных Курильских островов. *Автореферат диссертации ... канд. биол. наук*. Петропавловск-Камчатский. 25 с.
- Патент № 2041656 РФ. Способ получения пищевого полуфабриката из ламинариевых водорослей. *Тихоокеанский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии* (Подкорытова А.В., Ковалева Е.А., Аминина Н.М.).
- Пьянкова А.С. 2012. Получение и использование полисахаридов бурых водорослей. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. № 20. С. 62–66.

REFERENCES

- Alfimov N.N., Petrov Yu.E. 1972. On the biological and biochemical characteristics of some kelp and fuclean algae (Phaeophyta) of Bering Island (Commander Islands). *Botanicheskiy zhurnal (Botanical Journal)*. Vol. 57. № 6. P. 697–700.
- Aminina N.M., Klochkova N.G. 2002. Prospects for the development of algae processing on the coast of Kamchatka. *Ryibolovstvo Rossii (Russian Fishery)*. № 1. P. 54–56.
- Bogdanov V.D., Safronova T.M. 1993. Structuring agents and fish compositions. Moscow: VNIRO-press. 172 p.
- Vafina L.H. 2010. Justification of the integrated technology for processing of the brown algae (Phaeophyta) in obtaining functional food products. *Candidacy dissertation for technical sciences*. Moscow. 280 p.
- Vishnevskaya T.N., Sayapina T.A., Aminina N.M. 1999. Chemical composition and prospects of using extracts from the brown algae. *Proceedings of Russian scientific conference “New biomedical technologies using biologically active additives”*. Vladivostok. P. 10–12.
- Vyalkov A.N., Kozlov V.K., Bobrovnikskiy A.I. et al. 2008. Seaweed in rehabilitation medicine, complex therapy of metabolic diseases. Moscow: MDV. 156 p.
- Zatsepina A.N., Bessonova A.D. 2016. Justification of technology for obtaining products from brown algae. *Proceedings of National (All-Russian) scientific and practical conference “Natural resources, their present condition, protection, industrial and technical use”*. P. 115–119.
- Ivanyushina E.A., Zhigadlova G.G. 1994. Biology of the kelp species *Laminaria bongardiana* from the tidal zone of Bering Island (Commander Islands). *Biologiya morya (Marine Biology)*. Vol. 20. № 5. P. 374–380.
- Ogorodnikov B.C. 2007. Algae-macrophytes from the Northern Kuril Islands. *Abstract of the candidacy dissertation for biological sciences*. Petropavlovsk-Kamchatsky. 25 p.
- Patent № 2041656 RF. Method of obtaining a food semi-finished product from the laminariacean algae. *Pacific Fisheries and Oceanography Research Institute (Podkoryitova A.V., Kovaleva E.A., Aminina N.M.)*.
- Pyanova A.S. 2012. Production and utilization of brown algae polysaccharides. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta (Bulletin of Kamchatka State Technical University)*. № 20. P. 62–66.

Информация об авторах

Информация обо всех авторах размещается в конце статьи (после литературы) и приводится последовательно на русском и английском языках по схеме: фамилия, имя, отчество автора; название организации, индекс, страна, город; степень, звание, должность; электронный адрес (шрифт – 10,5; междустрочный интервал – 1; абзацный отступ – 0,7 см), идентификационные номера авторов в базах данных научного цитирования. **Дополнительно к комплекту документов должны быть приложены файлы-скриншоты с личного кабинета автора на сайте e-library с указанием SPIN-кода (для его подтверждения), а также при наличии – файлы-скриншоты ID-автора с сайта международной базы научного цитирования Scopus.**

Образец оформления информации об авторах

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Клочкова Татьяна Андреевна – Камчатский государственный технический университет; 683003, Россия, Петропавловск-Камчатский; доктор биологических наук, профессор кафедры «Экология и природопользование»; tatyana_algae@mail.ru. SPIN-код: 7534-7736, Author ID: 664379; Scopus ID: 12792241800.

Klochkova Tatyana Andreevna – Kamchatka State Technical University; 683003, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Doctor of Biological Sciences; Professor of Ecology and Nature Management Chair; tatyana_algae@mail.ru. SPIN-code: 7534-7736, Author ID: 664379; Scopus ID: 12792241800.

Образец оформления рисунков и таблиц в конце статьи

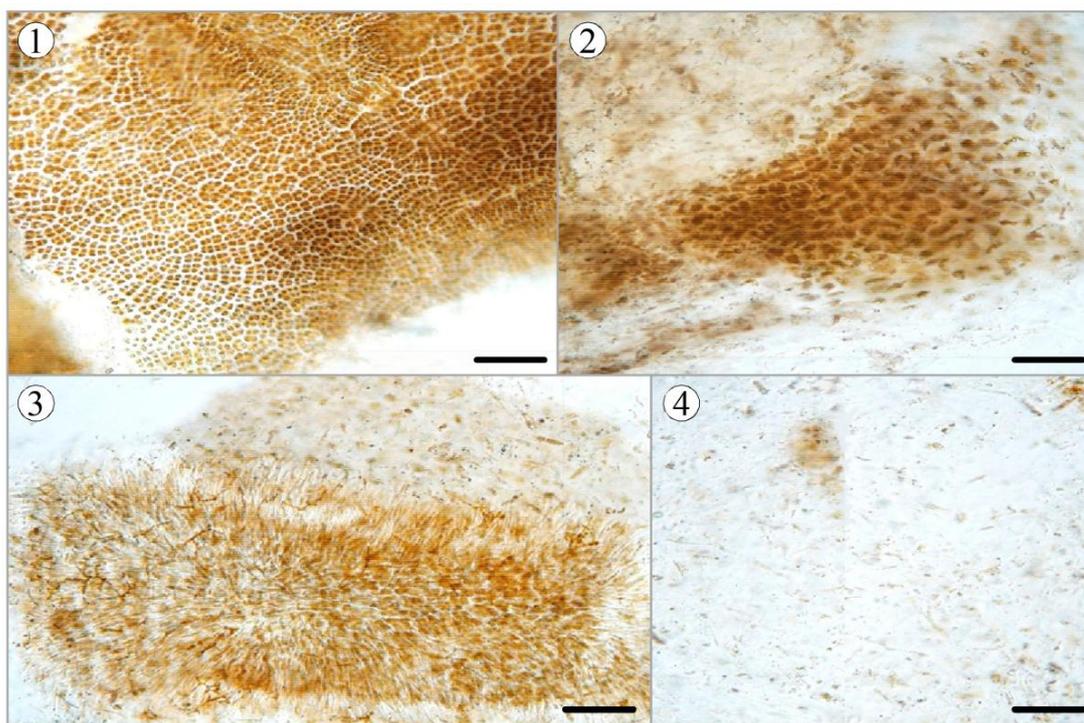


Рис. 1. Последовательность мацерации тканей *Saccharina bongardiana*: 1 – разделение дорсальной и вентральной половин слоевища и разрыхление корового слоя; 2 – разрыхление и дезинтеграция клеток меристодермы и медуллярной ткани; 3 – фрагмент соруса спорангиев с дезинтегрированными зооспорангиями и парафизами; 4 – мазок водорослевого биогеля в конце варки. Видны разрушенные нити сердцевины, отдельные парафизы и зооспорангии, небольшие скопления клеток меристодермы. Масштаб: 100 мкм (1, 3, 4), 50 мкм (2)

Fig. 1. The sequence of *Saccharina bongardiana* tissue maceration process: 1 – separation of the dorsal and ventral halves of the thallus and loosening of the cortical layer; 2 – loosening and disintegration of the meristoderm cells and medullary tissue; 3 – fragment of sporangial sori with disintegrated zoosporangia and paraphyses; 4 – smear of the algal biogel at the end of preparation. Broken filaments of the medullary tissue, individual paraphyses and zoosporangia, small clusters of meristoderm cells are visible. Scale: 100 μm (1, 3, 4), 50 μm (2)

Таблица 1. Мацерация дробленной *Saccharina bongardiana* в процессе ее термощелочной обработки

Table 1. Maceration of shredded *Saccharina bongardiana* thalli during thermo-alkaline treatment

Этап варки	Время варки (минут)	Средние размеры частиц (мм)	Характеристика изменений
1	10	4,01	Частицы плотные, целостные, без разделения на дорсальную и вентральную части
2	20	3,82	Частицы с начавшимся разделением на дорсальную и вентральную части. Наблюдается дробление крупных частиц
3	25	3,05	Продолжающийся процесс разрушения крупных частиц и расслоения пластины
4	30	2,6	Полное расслоение пластины, дезинтеграция клеток подкормки и сердцевины, дробление пластинок из коровой ткани и меристодермы
5	40	1,98	Продолжающаяся фрагментация частиц водорослей, разрыхление частиц, увеличение вязкости биогеля
6	50	0,83	Сильное набухание оставшихся частиц водорослей, почти полное разрушение оболочек клеток подкормки и меристодермы, увеличение вязкости биогеля

Учредитель:
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Камчатский государственный технический университет»

Издание зарегистрировано в Управлении Федеральной службы по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций по Камчатскому краю
Регистрационный номер ПИ № ТУ41-00321 от 01 декабря 2020 года

Главный редактор Т.А. Ключкова

Редактор О.В. Ольхина
Верстка, оригинал-макет Е.Е. Бабух

Адрес редакции, издателя:

683003, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35
Тел. (4152) 300-953. Факс (4152) 42-05-01
E-mail: kamchatgtu@kamchatgtu.ru
www.kamchatgtu.ru

Дата выхода в свет 31.03.2025 г.
Формат 60*84/8. Печать цифровая. Гарнитура PT Astra Serif
Авт. л. 8,94. Уч.-изд. л. 10,57. Усл. печ. л. 15,57
Тираж 500 экз. Заказ № 000007

Подписной индекс в каталоге «Почта России» ПН093

Цена свободная

Отпечатано в ООО «Камчатпресс Холдинг»
683017, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Кроноцкая, 12а

ISSN 2079-0333



9 772079 033418 >