

ISSN 2079-0333

**ВЕСТНИК  
Камчатского  
государственного  
технического  
университета**



Научный  
журнал

---

Основан в 2002 г.

---

16+

**ВЫПУСК**

**76**

**2026**

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 Единый государственный перечень научных изданий – (Белый список)  
Российского центра научной информации (<https://rcsi.science>),  
в Перечень рецензируемых научных изданий (ВАК РФ)  
(<https://vak.gisnauka.ru>)

Journal is included in the Unified State List of Scientific Publications (White List)  
of the Russian Scientific Information Center (<https://rcsi.science>),  
in List of peer-reviewed publications (State Commission  
for Academic Degrees and Titles of the Russian Federation)  
(<https://vak.gisnauka.ru>)

Журнал размещается  
в Научной электронной библиотеке,  
в международной информационной системе по водным наукам и рыболовству ASFIS

Journal is indexed in Scientific electronic library,  
in Aquatic Sciences and Fisheries International Information System ASFIS

ВЫПУСК

**76**

**2026**

Петропавловск-Камчатский

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- Клочкова Т.А.** (главный редактор, научный редактор, биологический раздел) 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
- Благонравова М.В.** (научный редактор, технический раздел) кандидат технических наук, доцент, начальник отдела науки и инноваций Камчатского государственного технического университета
- 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 Российской академии наук, член-корреспондент Российской академии образования, директор Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий Российской академии наук
- Дуленин А.А.** доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник Хабаровского филиала Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии
- Кадникова И.А.** доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник лаборатории безопасности и качества морского растительного сырья Тихоокеанского научно-исследовательского рыбохозяйственного центра
- Клочкова Н.Г.** доктор биологических наук, главный научный сотрудник Камчатского филиала Тихоокеанского института географии Дальневосточного отделения Российской академии наук
- Кострикова Н.А.** кандидат физико-математических наук, доцент, проректор по научной работе Калининградского государственного технического университета

- 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, ведущий научный сотрудник Института почвоведения и агрохимии Сибирского отделения Российской академии наук
- Марапулец Ю.В.** доктор физико-математических наук, доцент, директор Института космофизических исследований и распространения радиоволн 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
- Синявский Н.Я.** доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики Калининградского государственного технического университета
- Токранов А.М.** доктор биологических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник Камчатского филиала Тихоокеанского института географии Дальневосточного отделения Российской академии наук
- Ульрих Е.В.** доктор технических наук, доцент, профессор кафедры инжиниринга технологического оборудования, директор Химико-аналитического ресурсного центра Калининградского государственного технического университета
- Усов А.И.** доктор химических наук, главный научный сотрудник Института органической химии имени Н.Д. Зелинского Российской академии наук
- Цыганков В.Ю.** доктор биологических наук, доцент, заместитель директора по науке Тихоокеанского института географии Дальневосточного отделения Российской академии наук
- Чермошенцева А.А.** доктор технических наук, доцент, профессор кафедры физики и высшей математики Камчатского государственного технического университета
- Шулюпин А.Н.** доктор технических наук, член-корреспондент Российской академии наук, директор Института горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук

## EDITORIAL BOARD

- Klochkova T.A.** Doctor of Biological Sciences, Doctor of Philosophy in Biology (Ph.D.), Professor of Ecology and Nature Management Chair, Kamchatka State Technical University  
(Editor-in-Chief, Scientific Editor, biological sciences)
- Tzarenko S.N.** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Professor of Technical Machines and Equipment Chair, Kamchatka State Technical University  
(Scientific Editor, technical sciences)
- Vasilev M.V.** Candidate of Technical Sciences, Captain 1st rank, Head of Military Training Center, Kamchatka State Technical University  
(Scientific Editor, technical sciences)
- Blagonravova M.V.** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Science and Innovation Department, Kamchatka State Technical University  
(Scientific Editor, 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 Qualification Activity Sector of Science and Innovation Department, Kamchatka State Technical University  
(Technical Secretary)
- 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, 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
- Dulenin A.A.** Doctor of Biological Sciences, Leading Scientific Researcher, Khabarovsk Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography
- Kadnikova I.A.** Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Chief Researcher, Laboratory of Safety and Quality of Marine Plant Materials, Pacific Research Fisheries Center
- Klochkova N.G.** Doctor of Biological Sciences, Chief Scientific Researcher, Kamchatka Branch of the Pacific of Geographical Institute of the Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences
- Kostrikova N.A.** Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for Science, Kaliningrad State Technical University

- 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, Far Eastern State Technical Fisheries University
- Manakov Yu.A.** Doctor of Biological Sciences, Leading Scientific Researcher, Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
- Marapulets Yu.V.** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Director of Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation 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, Institute of Cosmophysical Research and Radio Waves Propagation of the Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences
- Sinyavsky N.Ya.** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Physics Chair, Kaliningrad State Technical University
- Tokranov A.M.** Doctor of Biological Sciences, Senior Researcher, Chief Scientific Researcher, Kamchatka Branch of the Pacific Institute of Geography of the Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences
- Ulrikh E.N.** Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Engineering of Technological Equipment Chair, Director of the Chemical-Analytical Resource Center, Kaliningrad State Technical University
- Usov A.I.** Doctor of Chemical Sciences, Chief Scientific Researcher, N.D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry of Russian Academy of Sciences
- Tsygankov V.Yu.** Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Science, Pacific of Geographical Institute of the Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences
- Chermoshentseva A.A.** Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Physics and Higher Mathematics Chair, Kamchatka State Technical University
- Shulyupin A.N.** Doctor of Technical Sciences, Correspondent Member of Russian Academy of Sciences, Director of Mining Institute of the Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences

## Содержание

### РАЗДЕЛ I. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

**Панов В.К., Белоусов А.Б., Белоусова М.Г.**

Экспериментальное моделирование периодичности в работе гейзера с питающей системой камерного типа .....8

**Царенко С.Н., Танасогло А.В., Голиков А.В.**

Разработка упрощенной математической модели для исследования динамики изгибных колебаний ступенчатых стоек.....25

**Чмыхалова В.Б.**

Применение барьерных пленок гидроколлоидов в технологиях мороженой продукции из гидробионтов .....41

### РАЗДЕЛ II. БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

**Клочкова Н.Г., Сизенцов Н.А.**

Содержание йода у разновозрастных генераций камчатской ламинариевой водоросли *Hedophyllum dentigerum* и его потери при их высушивании.....58

**Рыков Н.А., Науменко Е.Н., Авдеева Е.В.**

Микрофлора сельди и шпрота из юго-восточной части Балтийского моря.....73

**Седова Н.А.**

Морфология личинок второй стадии креветки *Spirontocaris spinus* (Decapoda, Thoridae) из Кроноцкого залива (северо-западная часть Тихого океана).....84

**Клочкова Т.А., Васильев М.В., Питиримов Н.Д.**

Актуализация списка видов пресноводных и почвенных водорослей Камчатки А.А. Еленкина, 1914 в соответствии с современными данными.....91

**Швецова А.А., Пак А.Л., Чебыкина Е.Ю., Динкелакер Н.В.**

Эколого-токсикологическая оценка почв подножья Микижинского мыса Елизовского района полуострова Камчатка .....111

## Contents

### SECTION I. TECHNICAL SCIENCES

<b>Panov V.K., Belousov A.B., Belousova M.G.</b> Experimental simulation of periodicity in operation of geyser with chamber-type feed system .....	8
<b>Tsarenko S.N., Tanasoglo A.V., Golikov A.V.</b> Development of a simplified mathematical model for studying the dynamics of bending vibrations of step racks .....	25
<b>Chmykhalova V.B.</b> Application of hydrocolloid barrier films in the technologies of frozen products from hydrobionts.....	41

### SECTION II. BIOLOGICAL SCIENCES

<b>Klochkova N.G., Sizontsov N.A.</b> Iodine content in different-age generations of kelp species <i>Hedophyllum dentigerum</i> from Kamchatka and its loss during drying .....	58
<b>Rykov N.A., Naumenko E.N., Avdeeva E.V.</b> Microflora of herring and sprattus from the southeast part of the Baltic Sea .....	73
<b>Sedova N.A.</b> Morphology of second-stage shrimp larva of <i>Spirontocaris spinus</i> (Decapoda, Thoridae) from Kronotsky Gulf (northwestern Pacific) .....	84
<b>Klochkova T.A., Vasilev M.V., Pitirimov N.D.</b> Updating the checklist by A.A. Elenkin (1914) of freshwater and soil algal species from Kamchatka in accordance with modern data .....	91
<b>Shvetsova A.A., Pak A.L., Chebykina E.Yu., Dinkelaker N.V.</b> Ecological and toxicological assessment of soils in proximity of Mikizhinsky Cape in Elizovsky District, Kamchatka.....	111

Научная статья

УДК 551.23

DOI: 10.17217/2079-0333-2026-76-8-24

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРИОДИЧНОСТИ В РАБОТЕ ГЕЙЗЕРА С ПИТАЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ КАМЕРНОГО ТИПА

Панов В.К.<sup>1</sup>, Белоусов А.Б.<sup>2</sup>, Белоусова М.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Камчатский государственный технический университет, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35.

<sup>2</sup> Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, б-р Пийпа, 9.

Периодичность извержений – одна из характерных черт гейзера. В этом ключевую роль играет газ/пар, выделяющийся из жидкости при снижении гидростатического давления по мере ее подъема по каналу. Наличие в верхней части подводящей системы полости определенных размеров, способной накапливать воду и газ/пар, является причиной периодичности извержений, при непрерывном подводе жидкости и газа/пара из глубин. Полость играет роль клапана, дозирующего количество извергаемого вещества. Модель гейзера с такой питающей системой, впервые предложенная Маккензи в 1811 г., подтвержденная прямыми инструментальными наблюдениями на некоторых гейзерах Камчатки, воплощена в экспериментальной установке. В проведенных на ней опытах установлена зависимость длительности стадий покоя, излива, фонтанирования, периода извержений от расходов жидкости и газа при неизменной геометрии системы. Получены описывающие их выражения.

**Ключевые слова:** видеосъемка, время покоя, гейзер, длительность извержения, длительность излива, периодичность извержений, регистрация давления.

Original article

## EXPERIMENTAL SIMULATION OF PERIODICITY IN OPERATION OF GEYSER WITH CHAMBER-TYPE FEED SYSTEM

Panov V.K.<sup>1</sup>, Belousov A.B.<sup>2</sup>, Belousova M.G.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Klyuchevskaya Str. 35.

<sup>2</sup> Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Piip Blvd., 9.

The main feature of the geyser is the periodicity of its eruptions. The key factor is the gas/vapor released from the liquid as its hydrostatic pressure decreases when it rises through the conduit. The presence of a cavity in the feeder system capable of filling with water and gas/vapor is one of the reasons for the periodicity of eruptions, in the case of continuous supply of fluid and gas/vapor from the depth. A geyser model with such feeding system, first suggested by Mackenzie in 1811 and later confirmed by direct instrumental observations of some Kamchatka geysers, has been implemented in an experimental setup. Experiments conducted on this setup established the dependence of the duration of quiescence, eruption, fountaining and eruption periods on the liquid and gas flow rates, with the system's geometry remaining constant. Expressions describing these relationships have been derived.

**Key words:** video footage, quiescence, geyser, eruption duration, pouring duration, eruption periodicity, pressure measurement.

## ВВЕДЕНИЕ

Гейзером называется природный гидротермальный источник, периодически выбрасывающий на поверхность пароводяную смесь [Нехорошев, 1959; Белоусов, Белоусова, 2024]. Главной чертой гейзера, отличающей его от других разновидностей кипящих источников, является прерывистость деятельности: выбросы воды и пара (составляющие извержение) разделяются четко выраженными стадиями полного покоя, когда на поверхность земли ничего не поступает, а происходит постепенное заполнение подземной системы гейзера, опустошенной в ходе его предшествующего извержения. По соотношению вода/пар и по интенсивности процесса извержение гейзера подразделяется на стадии излива (спокойное истечение воды), фонтанирования (бурный выброс воды и пара) и парения (выброс пара с постепенно уменьшающейся интенсивностью). Последовательность стадий извержения и покоя у гейзеров циклически повторяется с определенным временным интервалом, который называется периодом извержений, и является уникальной и достаточно устойчивой во времени характеристикой каждого гейзера. Многие гейзеры мира, которых всего насчитывается около одной тысячи, демонстрируют удивительную для природных образований регулярность извержений. Показательно, что при имеющемся большом разбросе в размерах гейзеров динамика их деятельности (циклический, многостадийный процесс) даже в деталях проявляет удивительное подобие, что указывает на единый физический механизм, лежащий в основе этого природного феномена.

Несмотря на длительную историю изучения гейзеров (более 200 лет в мире и 80 лет на Камчатке в России), механизм периодических извержений гейзеров до

сих пор является предметом дискуссии. Понимание механизма действия гейзеров, помимо интереса фундаментальной науки, важно и с прикладной точки зрения – для выяснения закономерностей функционирования гидротермальных систем, которые представляют практический интерес как источник безуглеродной зеленой энергии. Периодические «гейзероподобные» флуктуации расхода газожидкостных смесей иногда спонтанно и неконтролируемо возникают при эксплуатации различных искусственных гидродинамических установок (буровых скважин, химических заводов и систем охлаждения), что может приводить к техногенным авариям.

Главным препятствием в познании механизма действия гейзеров является недостаток данных о строении их подводных каналов, расположенных под поверхностью земли, а также о процессах, в них протекающих (каналы заполнены паром и горячей водой и труднодоступны для прямых наблюдений и измерений). В связи с этим физическое экспериментальное моделирование деятельности гейзеров служит одним из главных методов их исследования.

Всего в мире в разное время было создано около десяти разнообразных установок для физического моделирования гейзерного процесса [Adelstein et al., 2014; Дрознин, 1977]. Работа большинства этих установок тестировала теорию гейзерного процесса Бунсена [Bunsen, 1847], т. е. была основана на представлении, что питающая система гейзера имеет вид протяженного вертикального канала, а извержения вызываются резким вскипанием заполняющей канал перегретой воды. Вскипание и выброс воды провоцируется снижением гидростатического давления в канале гейзера по мере подъема воды. Эти установки в целом удовлетворительно воспроизводили периодическую деятельность природных

гейзеров, и теория Бунсена долгое время была общепринятой, не вызывая сомнений. Однако измерения температуры воды нескольких гейзеров показали, что температура на разных глубинах гейзерных каналов к моменту извержения не достигает значений, необходимых для вскипания воды [Hurwitz, Manga, 2017].

Это заставило усомниться в применимости теории Бунсена и вспомнить об альтернативной гипотезе гейзерного процесса, предложенной Маккензи [Mackenzie, 1811], который объяснил периодичность извержений эталонного Большого гейзера Исландии наличием в его питающей системе сложно построенной полости. Полость частично заполнена водой, паром и соединена с земной поверхностью сильно изогнутым каналом в форме сифона. Интерес к механизму Маккензи усилился после работ Белоусова и др. [Belousov et al., 2013; Белоусов, Белоусова, 2014], в которых на основе прямых видеонаблюдений в каналах камчатских гейзеров было показано соответствие их строения модели Маккензи. Вскоре после этого такой же тип питания был подтвержден различными геофизическими методами у многих гейзеров мира: например, в США [Hurwitz, Manga, 2017] и Исландии [Eibl et al., 2021]. Это привело к необходимости экспериментального изучения работы гейзера с питающей системой Маккензи, которое ранее не проводилось.

Представленная экспериментальная работа нацелена на выяснение ряда вопросов, возникающих при теоретическом описании процесса работы гейзера.

Разнообразие наблюдаемых особенностей этого явления в разных условиях сочетается с общими для всех гейзеров чертами. Их, по крайней мере, две:

- рабочее тело – это двухфазная газожидкостная среда;

- периодичность извержений при непрерывном питании канала жидкостью из пласта.

В большинстве случаев газожидкостная среда – это горячая пароводяная смесь, образующаяся в гидротермальных месторождениях, приуроченных к вулканно-сейсмоактивным областям. Известны также и холодные гейзеры, в которых основную «гейзерную» роль играет растворенный в воде углекислый газ. Кроме того, гейзерный режим присущ добычным скважинам на геотермальных и нефтегазовых месторождениях, которого стараются не допускать.

Для описания природного явления «гейзер», как отмечено выше, сложилось два физико-геометрических подхода, которые порой считаются альтернативными. При этом в работе традиционного пароводяного гейзера сочетается целый ряд процессов, относительно самостоятельных в том смысле, что каждый из них имеет место во множестве явлений, не связанных с гейзерами и потому хорошо изученных.

Среди них:

- фильтрационное течение жидкости в пласте;

- прогрев воды породами питающего пласта, возможное смешение с более холодной водой из других горизонтов, включая метеорную;

- парообразование при снижении гидростатического давления;

- кавитационная конденсация пара при его попадании в более холодную воду;

- другие.

В полевых условиях при изучении реальных гейзеров доступны для измерения в первую очередь характерные времена – период извержений, длительность излива, длительность периода покоя, высота выброса. Эти величины, очевидно, связаны с расходами воды и пара, с геометрией

подводящей системы. Порой удается провести измерение давления и температуры в канале, его размеров [Belousov et al., 2013; Белоусов, Белоусова, 2014].

В 2023–2024 гг. в рамках проекта РНФ № 23-27-00318 в Институте вулканологии и сейсмологии была создана крупномасштабная экспериментальная установка для физического моделирования работы гейзера с подводящей системой, предложенной Маккензи (1811). Установка воспроизводит структуру и принцип действия «ловушки для пузырей». Методологическая основа конструкции установки состоит в следующем.

Долговременная (месяцами и годами) стабильная работа гейзера свидетельствует о непрерывном питании системы постоянным глубинным расходом воды. Периодичность извержений гейзера формируется процессами с характерными временами порядка часа в самой верхней части канала. В модели Маккензи на уровне соединения полости с каналом может происходить потеря устойчивости динамического равновесия газожидкостной системы, как показано А.М. Нечаевым [2012], результатом чего становятся периодические выбросы на поверхность порций вещества при непрерывном его подводе из недр. Газожидкостный поток в выводном канале может реализовывать разные режимы течения: снарядный, пузырьковый и др. При этом для такой модели неважно, какой газ и какая жидкость питают гейзер/установку.

Схема установки для исследования свойств такой модели гейзера и закономерностей ее функционирования представлена на рисунке 1. Она состоит из бака объемом 300 л с герметичной крышкой. В крышку через уплотнение вставлена труба, имитирующая выводной канал гейзера. Ее длина, глубина погружения и диаметр в разных сериях опытов могут изменяться.

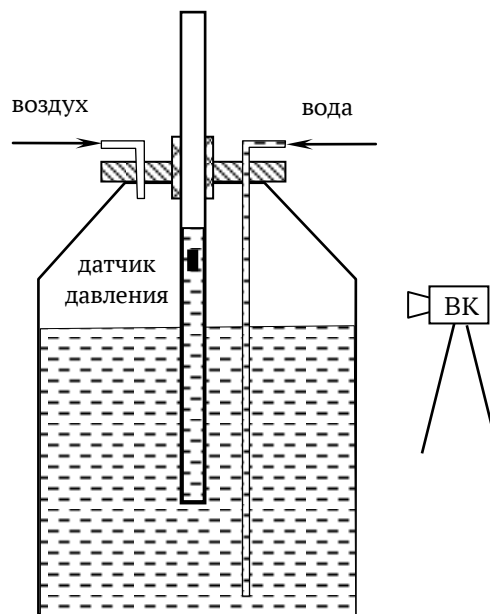


Рис. 1. Схема установки

Fig. 1. Installation diagram

Также через крышку поступают раздельно вода и воздух. Вода подается насосом из бассейна поблизости, объем которого в сравнении с объемом бака можно считать бесконечным. Верхняя часть бака над поверхностью воды выполняет роль упомянутой «ловушки для пузырей». Воздух, подаваемый в нее компрессором, вытесняет из нижней части бака воду через вертикальную трубу – выводной канал. При этом снаружи наблюдаются все характерные последовательно повторяющиеся стадии работы гейзера: покой, излив, фонтанирование.

Регистрирующая аппаратура, кроме расходомеров, включала автономный датчик давления, погружавшийся в канал, и видеокамеру для съемки процесса извержения.

В данной работе для изучения выделены только два вопроса: о роли газа – будь то водяной пар или любой другой, и геометрии подводящей системы в работе гейзера. А именно – зависимость временных характеристик периодического режима

извержения от: 1) расходов воды и газа; 2) соотношения размеров выводного канала и газовой полости-ловушки.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1. Датчик давления – металлический цилиндр длиной 50 мм, диаметром 20 мм. Чувствительный элемент вмонтирован в один из торцов. Датчик автономный: питание беспроводное от встроенного элемента, запись данных на встроенный носитель. Регистрируются давление и температура каждые 2 секунды. Датчик погружался в бак через трубу-канал на жесткой проволоке с грузом, поэтому его местоположение всегда известно. После серии опытов датчик извлекался, и данные переносились на компьютер.

На рисунке 3 представлена запись сигнала датчика при его погружении для тарировки в бак, полностью заполненный водой. Глубина от поверхности воды до дна 88 см. Глубина от поверхности до чувствительного элемента датчика 78 см. Уровень сигнала, помеченный на рисунке 3 меткой [1], равен 1,0096 бар – это атмосферное давление перед погружением. Уровень сигнала в точке [2] равен 1,089 бар. Их разность 0,078 бар соответствует давлению столба воды высотой 78 см, который находился над чувствительным элементом (рис. 2). Таким образом, сигнал датчика в последующих экспериментах свидетельствует о гидростатическом давлении в точке его нахождения при заполнении канала и последующем опустошении во время извержения.

2. Видеосъемка. Последовательность событий при извержении модельного гейзера регистрировалась видеокамерой с частотой 50 кадр/с. Поскольку бак и труба непрозрачны, анализ последовательности кадров совместно с записью датчика давления позволяет интерпретировать происходящее

внутри и сопоставлять с явлениями, наблюдаемыми снаружи. В этом отношении эксперимент полностью похож на полевые исследования авторов на реальных гейзерах.

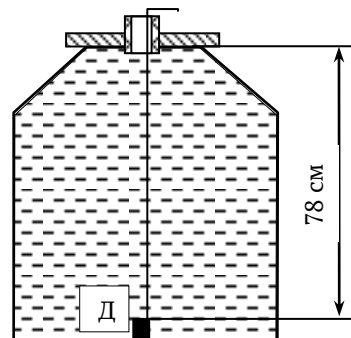


Рис. 2. Тарировка датчика

Fig. 2. Calibration of the sensor

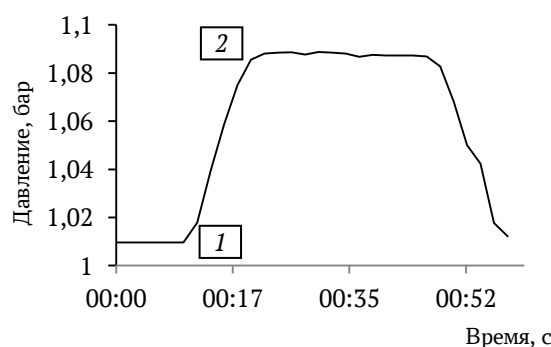
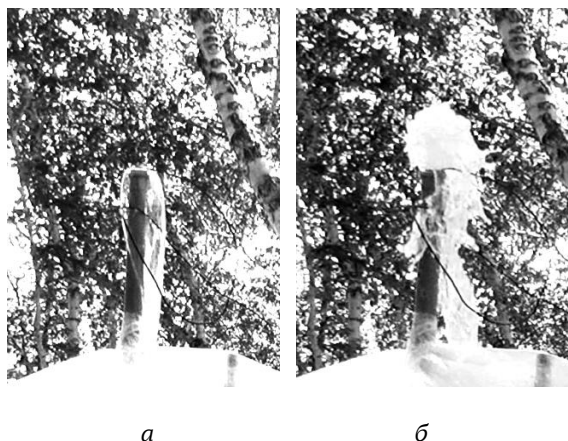


Рис. 3. Сигнал тарировки датчика давления

Fig. 3. Pressure sensor calibration signal

3. Описание процесса. Определение характерных времен. В серии опытов, проведенных с трубой внутренним диаметром 45 мм, длиной 155 см при длине выступающей над баком части 80 см, система демонстрировала устойчивый периодический режим. Он состоял из стадии покоя, когда снаружи не наблюдалось никаких событий, затем следовала стадия спокойного излива, после чего происходил интенсивный выброс воды с воздухом (стадия фонтанирования) (рис. 4). Далее все повторялось.

Рис. 4. Кадры съемки: *а* – излив, *б* – начало выбросаFig. 4. Shooting frames: *a* – spout, *b* – emissions start

Характерная форма сигнала датчика давления в одном из опытов представлена на рисунке 5. На нем точками отмечены промежутки времени, которые при сопоставлении с последовательностью кадров видеозаписи отождествляются так. В промежутке времени  $t_1-t_2$  снаружи ничего не происходит – стадия покоя, но при этом канал заполняется водой. Промежуток  $t_2-t_3$  соответствует стадии излива, а промежуток  $t_3-t_4$  – это фонтанирование.

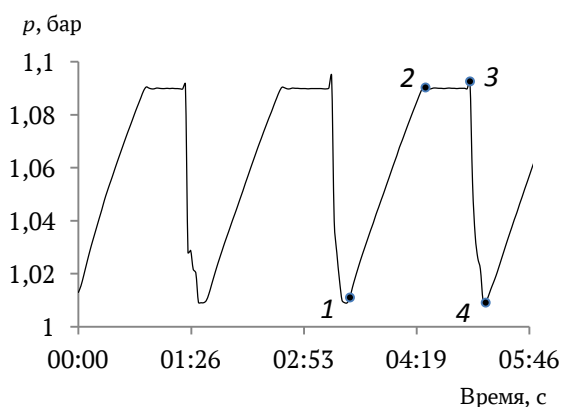


Рис. 5. Форма сигнала датчика давления

Fig. 5. Pressure sensor signal shape

Средние значения длительности промежутков, определенные по видеосъемке

и по записи датчика, показывают хорошее совпадение. Есть и отличия, связанные, во-первых, с тем, что интервал оцифровки датчика 2 с, а интервал между кадрами при обработке видеозаписи 0,033 с. Во-вторых, не всегда удается однозначно определить кадр, который следует считать началом соответствующего интервала. В-третьих, длительность выброса струи воды из канала, видимая на съемке, составляет ~ 40% длительности выброса газа, которая видна по записи давления. Недостающие 60% соответствуют выбросу прозрачного воздуха, это соответствует стадии парения природного гейзера. На линии записи спада давления (рис. 6) видны вторичные пики – выход отдельных пузырей воздуха внутри выводного канала.

Сопоставление результатов измерений представлены в таблице для серии опытов при постоянном расходе воды 7 л/мин. Отличие не носит иного систематического характера, кроме приборной погрешности. Она составляет для датчика давления при измерении времени излива от 20% (при длительности 5 с) до 1,2% (при длительности 82,5 с). Погрешность измерения давления составляет  $10^{-3}\%$ . Погрешность определения длительности по съемке оценивается от 1% (при длительности 7 с) до 0,08% (при длительности 82,5 с).

На выделенном на рисунке 5 импульсе рост давления начинается сразу после окончания его спада. При этом значение давления в точке 4 равно атмосферному – 1,014 бар, в точке 2 – 1,09 бар. Значит, канал опустошился до уровня расположения датчика на глубине 76 см от уровня среза трубы. Перед началом предыдущего выброса заметна небольшая горизонтальная «полка» – уровень воды опускался несколько ниже поверхности чувствительного элемента датчика, возможен некоторый разброс.

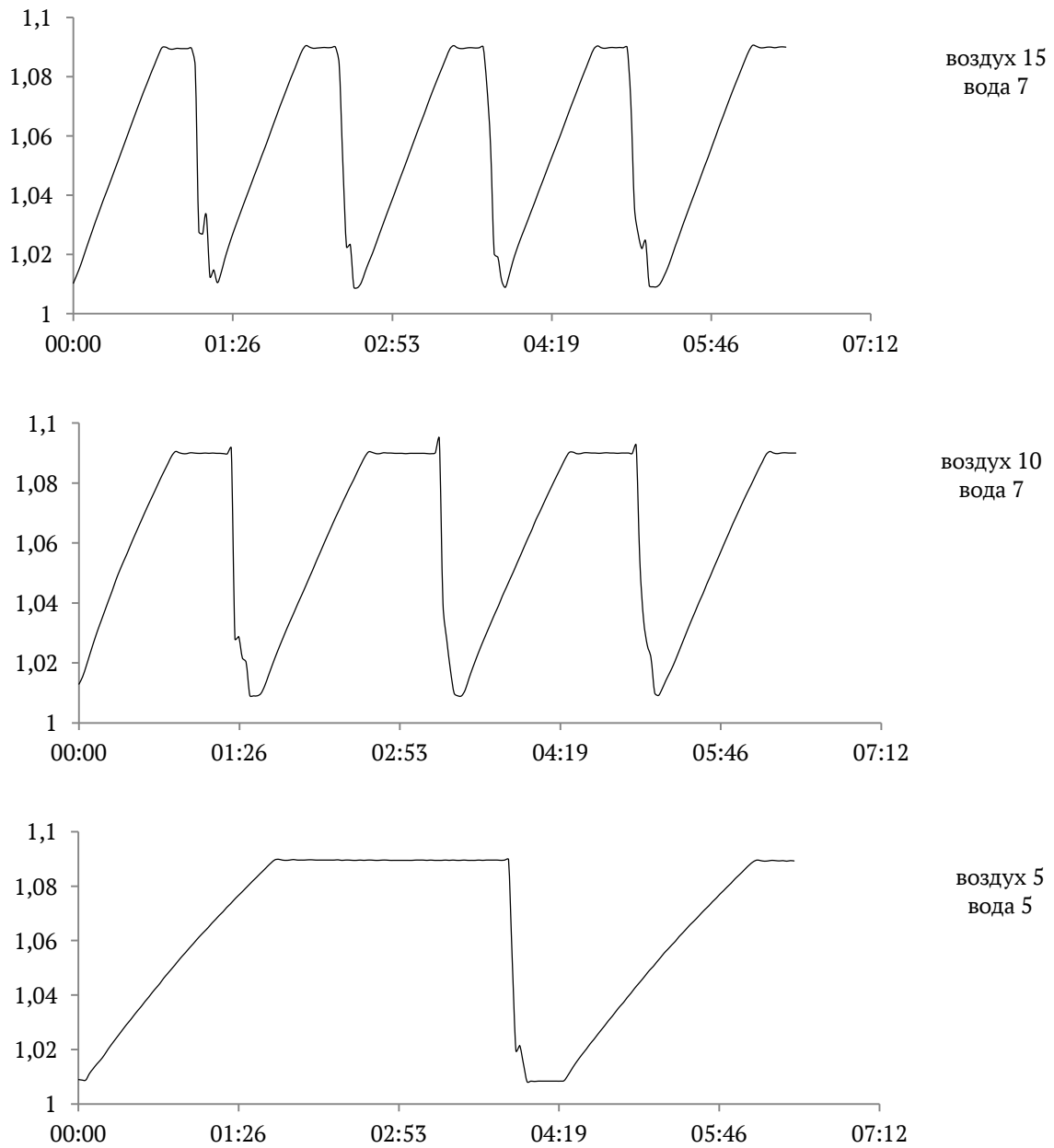


Рис. 6. Сигнал давления при разных расходах

Fig. 6. Pressure signal at different flow rates

Таблица. Сопоставление результатов измерений

Table. Comparison of measurement results

Расход воздуха, л/мин	Излив, с		Выброс, с		Период, с	
	датчик	съёмка	датчик	съёмка	датчик	съёмка
25	5,0	7	9	4,5	56	56,7
20	5,9	5,3		4,3	53	53,3
15	17,0	19,4	12	3,9	80	80,2
10	34,0	35,6	10	3,8	105	107,4
5	82,5	82,5		3,5	170	166,8

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

*Результаты экспериментов*

Для первоначального выявления закономерностей, присущих временным характеристикам гейзерного режима работы установки, опыты проводились с неизменной геометрией: канал внутренним диаметром 45 мм, длиной 155 см, выступающая над баком часть 80 см.

На записи сигнала давления (см. рис. 6) хорошо видно изменение характерных времен процесса при изменении режима питания установки, что дает методическую возможность для дальнейшего выявления закономерностей процесса.

В такой геометрии проведено две серии опытов: 1) при постоянном расходе воды 7 л/мин и различном расходе воздуха – 5, 10, 15, 20, 25 л/мин; 2) при постоянном расходе воздуха 15 л/мин и различном расходе воды – 4, 6, 8, 10, 12 л/мин. Диапазон изменения расходов определялся возможностями оборудования.

Результаты измерений в каждой серии представлены на рисунках 7 и 8. На них безразмерная величина  $T/T_{\min}$  – длительность промежутка, отнесенная к ее значению при минимальном расходе, в зависимости от  $W/W_{\min}$  – отношения расхода к минимальному в серии. Графики показывают, во сколько раз изменяется промежуток при кратном изменении расхода.

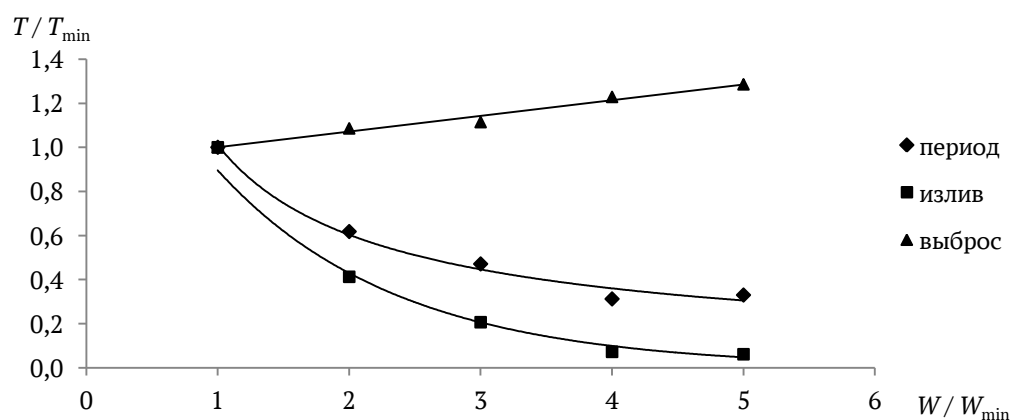


Рис. 7. Постоянный расход воды

Fig. 7. Constant water flow rate

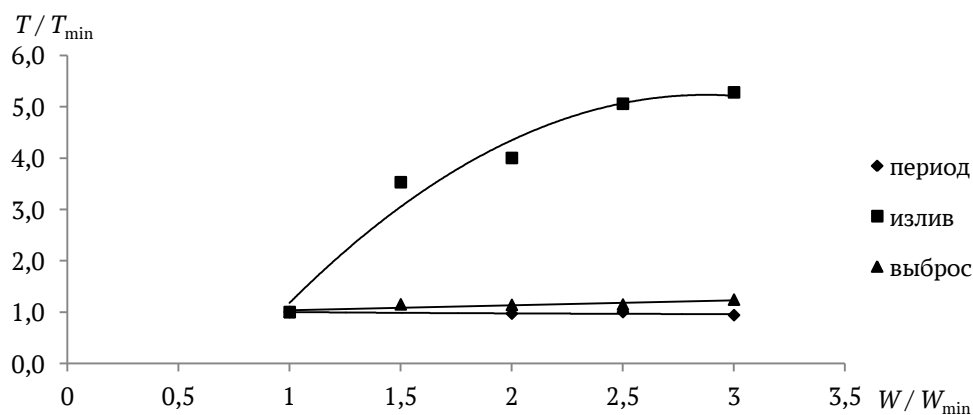


Рис. 8. Постоянный расход воздуха

Fig. 8. Constant air flow rate

Представленные данные свидетельствуют о неодинаковой реакции системы на изменение расхода одного из компонентов при неизменном расходе второго.

Отметим по отдельности, как на длительность промежутков влияет изменение расходов.

1. Период извержений, как видно из рисунка 9, при неизменном расходе воздуха практически не меняется (в пределах погрешности опытов) с изменением расхода воды в три раза. И наоборот, при неизменном расходе воды период оказывается очень чувствителен к воздуху – уменьшается в три раза при пятикратном росте его расхода.

2. Продолжительность разлива при постоянном расходе воздуха увеличивается в пять с лишним раз при трехкратном увеличении подачи воды. В свою очередь увеличение расхода воздуха в пять раз при неизменной воде способствует уменьшению времени разлива без малого в 12 раз.

3. Наконец, продолжительность выброса, регистрируемая датчиком, практически не меняется, продолжительность видимой части увеличивается на 20–30%, при кратном росте расходов обоих компонентов.

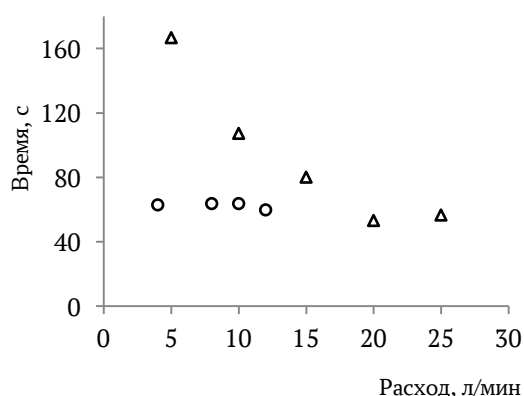


Рис. 9. Зависимость периода от расходов: ○ – постоянный расход воздуха; △ – постоянный расход воды

Fig. 9. The period dependence on the flow rates: ○ – constant air flow rate ; △ – constant water flow rate

### Анализ и обсуждение результатов эксперимента

Описание процессов, происходящих в экспериментальной модели гейзера, может быть дано в первом приближении с позиций равновесной термодинамики и гидравлики.

Газ в полости, соединяющейся с каналом, заполненным водой, находится в равновесии, когда его давление равно гидростатическому в канале на уровне полости. Предельное состояние равновесия соответствует ситуации, когда граница газ-жидкость в полости находится на уровне нижнего края канала. При увеличении количества газа в полости он начнет проникать в канал, вытесняя оттуда жидкость. Это приведет к уменьшению гидростатического давления на уровне нижнего среза канала, а значит к дальнейшему расширению газа из полости в канал, дальнейшему вытеснению жидкости из канала. Извержение будет продолжаться до тех пор, пока давление остающейся в канале жидкости не сравняется с давлением остающегося в полости газа и система не придет к новому состоянию равновесия.

Из этих соображений в статье [Belousov et al., 2013] установлен наименьший объем газовой полости, приводящий к режиму периодических извержений гейзера при непрерывном газожидкостном питании системы:

$$V_{\min} = kS(H + p_a / \rho g). \quad (1)$$

Здесь  $k$  – показатель адиабаты газа;  
 $S, H$  – площадь сечения и глубина канала на уровне его соединения с полостью;  
 $p_a$  – атмосферное давление;  
 $\rho$  – плотность жидкости.

В установке с указанной выше геометрией  $V_{\min} = 25,7$  л это примерно объем верхней конической части бака.

Выражение (1) подразумевает, что течение газожидкостного потока в канале будет происходить преимущественно в снаряжном режиме, т. е. порции газа, проникающие в канал, заполняют большую часть его сечения и при подъеме, расширяясь, выталкивают воду на значительную высоту. Снарядный режим движения газожидкостного потока возможен в ограниченной области параметров. Например, увеличение диаметра канала при прочих равных условиях приведет к смене режима от периодических выбросов к непрерывному барботированию отдельных пузырей без выброса фонтана.

Для дальнейших построений будем отсчитывать время от момента начала заполнения канала, считая, что при этом поверхность воды в баке находится на уровне нижнего среза трубы – закончился предыдущий выброс – на рисунке 10 отметка 0-0. В этот момент объем воздуха в баке равен  $V_{в0}$ , давление  $p_0$ . Расходы воды  $Q$  и воздуха  $W$  считаем постоянными, невзирая на отмеченные небольшие пульсации от нагнетателей. Это оправдано по крайней мере для  $Q$ , поскольку давление на записи датчика в промежутке  $t_1-t_2$  растет практически линейно (рис. 11). Только при малых расходах точки лучше аппроксимируются логарифмическим законом, характерным для процесса наполнения компрессором баллона.

1. Стадия покоя.

В стадии покоя – промежуток  $t_{нап} = t_2 - t_1$  на рисунке 5 – расход воды частично поступает в канал диаметром  $d$ , заполняя объем  $V_{кан}$  от уровня  $h_2$  до уровня  $H$  (рис. 10), частично в бак диаметром  $D$ , заполняя объем  $0-h_1$ :  $Q = Q_{кан1} + Q_{б1}$ . Эти расходы можно найти так:

$$Q_{кан1} = \frac{H-h_2}{t_{нап}} \frac{\pi d^2}{4} = \frac{V_{кан}}{t_{нап}}; Q_{б1} = Q - Q_{кан1}. \quad (2)$$

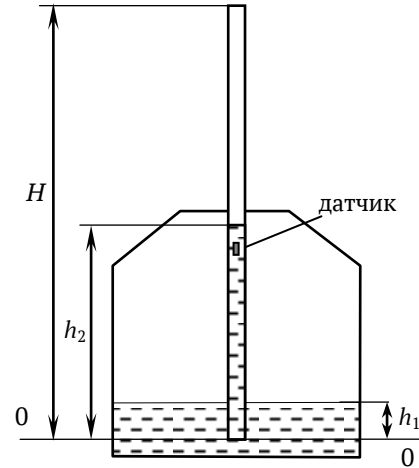


Рис. 10. Геометрия установки

Fig. 10. Installation geometry

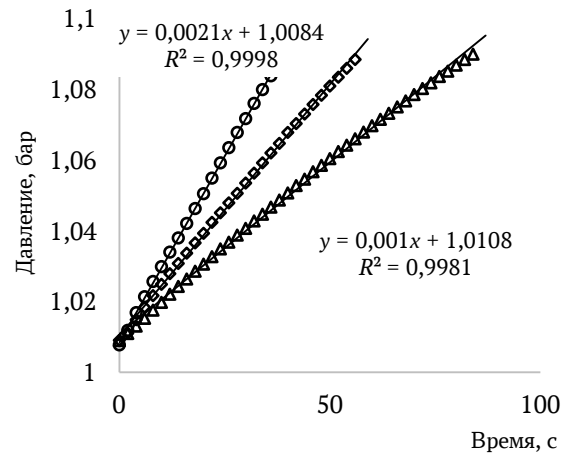


Рис. 11. Наполнение канала. Расходы:  $\circ$  – 25 / 7;  $\square$  – 10 / 7;  $\Delta$  – 10 / 5

Fig. 11. Channel filling. Flows rates:  $\circ$  – 25 / 7;  $\square$  – 10 / 7;  $\Delta$  – 10 / 5

За время наполнения канала  $t_{нап}$  уровень воды в баке поднимется до отметки  $h_1$ :

$$h_1 = \frac{4}{\pi D^2} (Q \cdot t_{нап} - V_{кан}). \quad (3)$$

В наших опытах эта величина оценивается в пределах от 0,86 см при  $W/Q = 25/7$  л/мин до 2 см при  $W/Q = 5/7$  л/мин.

В момент  $t_2$  объем, занятый газом  $V_{в1}$ , определится выражением:

$$V_{в1} = V_{в0} - (Q \cdot t_{нап} - V_{кан}). \quad (4)$$

При этом к начальной массе воздуха в нем  $m_{в0}$  добавится масса, поданная компрессором:

$$m_{в1} = m_{в0} + \Delta m_{в}, \quad (5)$$

и давление станет  $p_1$ . Эти массы определяются из уравнения состояния для порции и для потока идеального газа:

$$m_{в0} = \frac{p_0 V_{в0} \mu}{R_0 T}; \quad m_{в1} = \frac{p_1 V_{в1} \mu}{R_0 T};$$

$$\Delta m_{в} = \frac{(p_0 + p_1) W \mu}{2 R_0 T} t_{нап}. \quad (6)$$

Подстановка выражений (6) при одинаковой температуре (а она меняется мало за время наполнения канала) в (5) с учетом (4) приводит к выражению:

$$t_{нап} = \frac{V_{в0}(p_1 - p_0) + V_{кан} p_1}{W p_{cp} + Q p_1},$$

где  $p_{cp} = \frac{p_1 + p_0}{2}$ . (7)

Из (7) следует обратная зависимость времени наполнения канала от расходов при неизменной геометрии системы. Приведенные выше размеры установки дают значение  $p_{cp}$  близкое к  $p_1$ . Поэтому зависимость от каждого из расходов практически одинаковая. На рисунке 12 сопоставлены расчеты по выражению (7) с измерением по сигналу давления при  $Q = 7$  и  $W = 15$  л/мин. Отличие  $\approx 10\%$ .

Давления  $p_0$  и  $p_1$  складываются из атмосферного и гидростатического:

$$p_0 = 10 + h_2; \quad p_1 = 10 + H - h_1,$$

где  $10 = p_a / \rho g$  – атмосферное давление в метрах водяного столба. С учетом этого

выражение (7) может быть приведено к виду с участием измеряемых в эксперименте геометрических величин:

$$t_{нап} = \frac{V_{в0}(H - h_1 - h_2) + V_{кан}(10 + (H - h_1))}{W \left( 10 + \frac{H - h_1 + h_2}{2} \right) + Q(10 + (H - h_1))}. \quad (8)$$

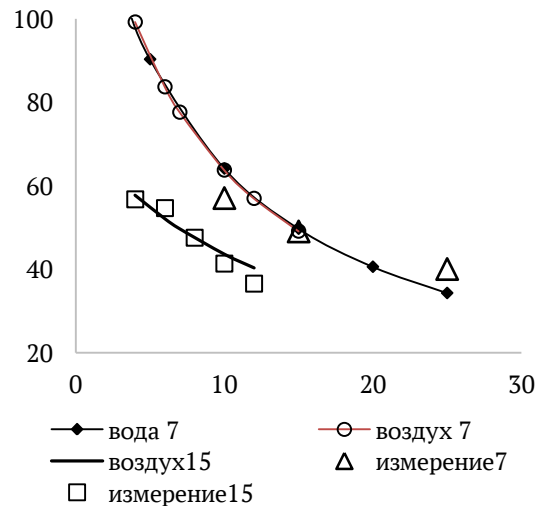


Рис. 12. Время наполнения канала

Fig. 12. Channel filling time

Стоит отметить, что при малых расходах величина  $h_2$ , т. е. количество воды, оставшейся в канале после выброса, становится меньше, а объем  $V_{кан}$  несколько увеличивается. Об этом свидетельствует горизонтальный участок в сигнале давления между выбросами (см. рис. 6). Поэтому зависимость  $t_{нап}$  от объемов  $V_{в0}$  и  $V_{кан}$  может отличаться от линейной.

### 2. Стадия излива.

Излив начинается в момент  $t_2$  на рисунке 5 и заканчивается начинающимся выбросом – момент  $t_3$ . За время излива  $t_{изл} = t_3 - t_2$  давление воздуха в баке не меняется (см. рис. 5 и 6), равно гидростатическому давлению воды, заполняющей канал, поверхность воды в баке не поднимается. Поэтому весь поступающий расход

воды направляется в канал. Кроме того, количество воздуха в баке увеличивается, объем его растет, вытесняя воду из объема  $V_{\text{бак}}$  между отметками 0– $h_1$ . Поэтому расход воды через канал будет значительно больше  $Q$ , подаваемого насосом:  $Q_{\text{кан2}} = Q + Q_{62}$ . Этот расход можно вычислить по геометрии установки и измеренным  $t_{\text{нап}}$  и  $t_{\text{изл}}$ . Так, при неизменных расходах  $W = 15$  л/мин и  $Q = 12$  л/мин излив происходит с расходом  $Q_{\text{кан2}} = 30,9$  л/мин, а при  $Q = 6$  л/мин расход  $Q_{\text{кан2}} = 25,6$  л/мин, т. е.кратно превышает поступающий от насоса.

Явление излива, перелива через преграду хорошо изучено применительно к различным гидротехническим сооружениям. При переливе уровень воды поднимается выше уровня поверхности преграды. Разница уровней зависит от целого ряда величин: геометрии преграды и русла потока, условий подхода потока и т. д., но в любом случае она пропорциональна расходу воды. Если преграда в плане замкнутый контур – вертикальная труба, то подъем уровня потока над преградой,  $h$  на рисунке 13, связан с объемным расходом выражением:

$$Q = m_0 \pi d \sqrt{2g} h^{3/2}, \quad (9)$$

где  $m_0$  – так называемый коэффициент расхода, меньший 1, зависит от геометрии (формы и относительных размеров) насадка;  $d$  – его диаметр;

$g$  – ускорение свободного падения.

Для цилиндрического насадка длиной более  $3d$  можно принять  $m_0 = 0,402\text{--}0,405$  [Штереншлихт, 1984]. Тогда для условий упомянутого выше опыта при измеренных значениях  $h$ , равных 17 и 12,5 мм, расчет расхода воды по выражению (9) дает значения 33,9 и 21,4 л/мин соответственно, что близко к величинам, приведенным выше.

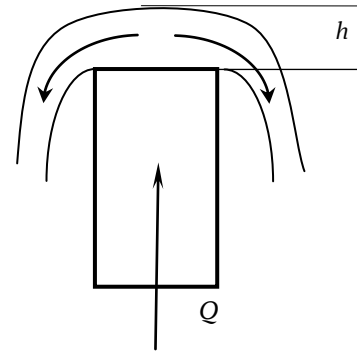


Рис. 13. Излив

Fig. 13. Spout

Продолжительность излива можно определить из следующих соображений. Объем  $V_{\text{бак}}$  от нулевой отметки до уровня  $h_1$  за время  $t_{\text{нап}}$  был заполнен водой. Теперь за время  $t_{\text{изл}}$  этот же объем будет заполнен воздухом, поступающим в бак с расходом  $W$ :

$$W t_{\text{изл}} = Q \cdot t_{\text{нап}} - V_{\text{кан}}. \quad (10)$$

Отсюда с использованием выражения (7) определится время излива:

$$t_{\text{изл}} = \frac{1}{W} \frac{V_{\text{в0}}(p_1 - p_0)Q - V_{\text{кан}} p_{\text{ср}} W}{p_1 Q + p_{\text{ср}} W}. \quad (11)$$

Выражение (11) при постоянном расходе воздуха представляет собой дробно-линейную функцию, и зависимость времени излива от расхода воды описывается возрастающей ветвью гиперболы. Зависимость  $t_{\text{изл}}$  от расхода воздуха при постоянном расходе воды благодаря множителю  $1/W$  более сильная, убывающая. Сопоставление полученных зависимостей для времени излива (сплошные линии на рис. 14) с экспериментом показывает хорошее соответствие.

Отношение времен наполнения и излива зависит от отношения расходов воды и воздуха. Поделив выражение (7) на выражение (11), получим:

$$\frac{t_{\text{нап}}}{t_{\text{изл}}} = \frac{(p_1 - p_0) + p_1 \frac{V_{\text{кан}}}{V_{\text{в0}}}}{(p_1 - p_0) \frac{Q}{W} - p_{\text{ср}} \frac{V_{\text{кан}}}{V_{\text{в0}}}} \approx \frac{1}{Q/W}. \quad (12)$$

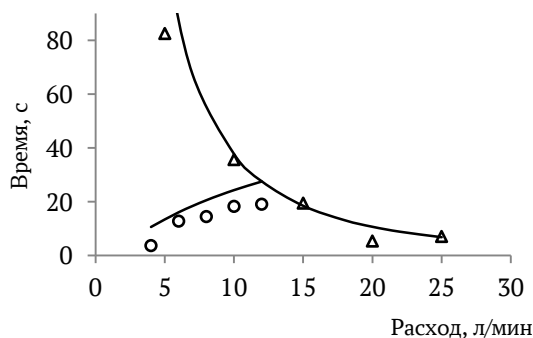


Рис. 14. Время излива при постоянном расходе: ○ – воздуха; △ – воды

Fig. 14. Spout time at constant flow rate: ○ – air; △ – water

Эта зависимость представлена сплошной линией на рисунке 15. Сопоставление с отношением экспериментально измеренных времен (точки) показывает вполне удовлетворительное соответствие.

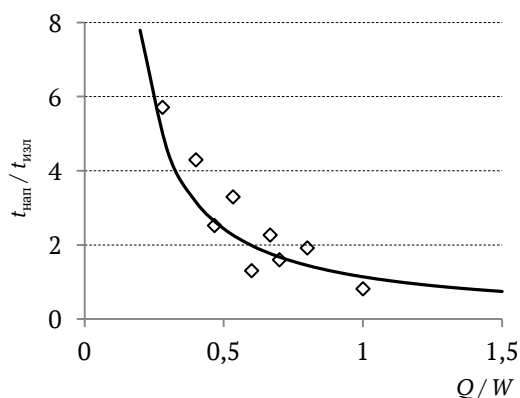


Рис. 15. Влияние отношения расходов воды и воздуха на соотношение времен покоя и излива

Fig. 15. The effect of the ratio of water and air flow on the ratio of rest and spout times

Практически обратно пропорциональная зависимость (12) означает, например, что с увеличением расхода воды (отношение  $Q/W$  растет) время наполнения систе-

мы водой уменьшается, поскольку канал заполняется быстрее. Однако в бак поступает большее количество воды, его дольше нужно выдавливать в канал и длительность излива растет.

Рост отношения  $Q/W$  за счет уменьшения расхода воздуха приводит к увеличению обоих времен, но продолжительность излива сильнее зависит от расхода воздуха, поэтому отношение  $t_{\text{нап}}/t_{\text{изл}}$  все равно уменьшается.

### 3. Стадия извержения, выброс.

Извержение начинается после достижения поверхностью воды, вытесняемой воздухом, уровня нижнего среза трубы, когда он начинает расширяться в канал. Количество воздуха  $\Delta m_{\text{в}}$ , поступившего в бак за время  $t_{\text{нап}} + t_{\text{изл}}$ , полностью выйдет за время выброса в атмосферу, выталкивая воду из канала.

Описание этого процесса уравнениями гидро- и термодинамики выходит за рамки данной работы, тем более их решение. Для качественного анализа воспользуемся результатами решения физически близких задач. Это, к примеру, задачи внутренней баллистики, в которых расширяющиеся пороховые газы ускоряют снаряд, преодолевая сопротивление поверхности ствола. Существенное отличие здесь в том, что извергающийся гейзер выталкивает жидкий, а не твердый, «снаряд», причем уменьшающейся массы. Другой близкий пример – истечение газа из сосуда высокого давления в среду с постоянным противодействием. Такая задача относительно времени истечения, расхода газа решена в работе [Тарасов, 2016]. Для случая дозвукового истечения воздуха в атмосферу зависимость имеет вид:

$$t_{\text{ист}} = \frac{V_0}{S a_0} \left( \frac{p_0}{p_a} \right)^{0,295} \sqrt{5 \left( \left( \frac{p_0}{p_a} \right)^{0,286} - 1 \right)}. \quad (13)$$

Здесь  $V_0$  – объем сосуда;

$S$  – площадь отверстия;

$a_0$  – скорость звука;

$p_0, p_a$  – начальное давление газа в сосуде и давление атмосферы.

Из выражения (13) применительно к условиям обсуждаемого эксперимента следует, что при неизменной геометрии установки ( $d_{\text{кан}}, H - \text{const}$ ) начальное (перед извержением) давление  $p_0$  воздуха в баке не изменяется, поскольку равно давлению столба жидкости высотой  $H$ . Значит и время выброса/извержения должно оставаться одинаковым, независимо от расходов воздуха и воды.

Вместе с тем расчет времени истечения по выражению (13) применительно к условиям эксперимента дает величину  $\approx 0,15$  с, что на порядок меньше измеренного.

Первая причина в том, что решение (13) получено для газа, расширяющегося в атмосферу с постоянным давлением. В нашем случае противодействие расширяющемуся газу – это, кроме атмосферного, давление столба выталкиваемой воды, которое по мере ее истечения уменьшается, что увеличивает время истечения.

Кроме этого, работа расширения в первом случае тратится на вытеснение и ускорение окружающего атмосферного воздуха малой плотности. В нашем случае эта работа тратится в наибольшей степени на ускорение воды в канале, плотность которой почти на три порядка больше плотности атмосферного воздуха, и время ее разгона больше.

Однако, даже с учетом приведенных соображений, сделанный выше вывод о независимости времени извержения от расходов, остается в силе. Основание для этого дает закон сохранения энергии. Работа расширения истекающим воздухом совершается за счет убыли внутренней энергии количества воздуха  $\Delta m_v$ , поступившего

в бак за время  $t_{\text{нап}} + t_{\text{изл}}$ . А оно при неизменной геометрии постоянно, т. к. объем  $V_{в0}$  и давление  $p_0$  при этом не меняются.

Вместе с тем следует учесть, что за время извержения-выброса, хоть и непродолжительное, поступление и воды и воздуха в систему продолжается, и эта небольшая добавка пропорциональна расходам. По-видимому, с этим и связано отмеченное по видеосъемке небольшое увеличение времени выброса  $t_{\text{выб}}$  при увеличении расходов (рис. 16), хотя для такого утверждения требуются более тщательные измерения.

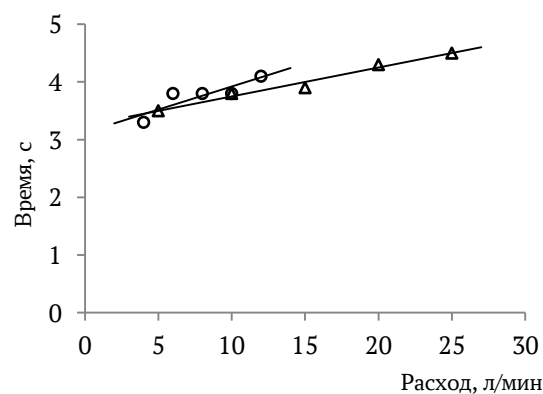


Рис. 16. Длительность выброса при постоянном расходе:  $\circ$  – воздуха;  $\Delta$  – воды

Fig. 16. Duration of emissions at constant flow rate:  $\circ$  – air;  $\Delta$  – water

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный эксперимент по моделированию работы гейзера с питающей системой камерного типа показал следующее.

1. Питающая система гейзера с полостью, наполняемой газом/паром, выделяющимся из жидкости, способна к периодическим извержениям, несмотря на непрерывный подвод жидкости из глубин. Полость играет роль клапана, дозирующего количество извергаемого вещества в зависимости от его геометрических параметров. Роль газа/пара в периодической работе гейзера –

определяющая, благодаря способности газов к многократному расширению.

2. Период извержений и продолжительность его последовательных фаз покоя и излива зависит от расходов жидкости и газа, причем в разной степени.

3. В период покоя гейзера происходит его наполнение газожидкостным рабочим телом. Как показывает выражение (7), время наполнения линейно зависит как от объема полости, в которой накапливается газ, так и от объема канала выше уровня полости (глубины). Действительно, бóльший объем полости означает бóльшее количество накапливающегося газа в нем. Равно как и бóльший объем канала (пропорционально глубине) приводит к тому же из-за бóльшего гидростатического давления в канале на уровне полости, а значит и давления газа в ней.

От расходов жидкости и газа время наполнения зависит обратно пропорционально, и если расходы независимы, как в нашем эксперименте, то практически в равной степени.

4. Длительность излива, так же как и наполнения, от объемов зависит линейно. А влияние расходов жидкости и газа различно. При увеличении расхода жидкости и неизменном расходе воздуха длительность излива растет – бóльшее количество воды приходится выдавливать из полости в канал.

Расход газа имеет обратное влияние – с его увеличением быстрее происходит вытеснение воды из полости в канал, время излива сокращается. При этом влияние расхода газа гораздо более сильное, как следует из выражения (11), подтвержденного измерениями.

5. Отношение времен покоя и излива оказывается в обратно пропорциональной зависимости от отношения расхода воды к расходу газа. Это дает возможность для реального гейзера, измерив эти времена,

и отдельно, при возможности, геометрию системы, посчитать отношение расходов. А измерив расход воды, например, в стадии излива, далее посчитать расход пара и затем «тепловую мощность» питающей системы.

Таким образом, выявленные в представленном эксперименте закономерности и описывающие их в первом приближении выражения могут быть использованы для дальнейшего более детального описания работы гейзера с питающей системой камерного типа и планирования последующих экспериментов.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-27-00318 (Механизм периодического действия гейзеров, эволюция динамики их извержений при изменениях окружающей среды и геологической обстановки).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

- Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. 2014. Как устроены гейзеры и почему их много в Долине Гейзеров? *Труды Кроноцкого государственного природного биосферного заповедника*. Вып. 3. С. 142–151.
- Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. 2024. Гейзеры – геотермальные источники, по которым можно сверять часы. *Природа*. № 9. С. 3–15.
- Дроздин В.А., Разина А.А. 1977. О природе гейзерного режима. В кн.: Гидротермальный процесс в областях тектономагматической активности. Москва: Наука. С. 96–103.

- Нехорошев А.С. 1959. К вопросу о теории действия гейзеров. *Доклады АН СССР*. № 127(5). С. 1096–1098.
- Нечаев А.М. 2012. О механизме извержения гейзера. *Труды Кроноцкого государственного природного биосферного заповедника*. Вып. 2. С. 135–143.
- Тарасов В.В. 2016. Расчет времени истечения идеального газа из резервуара постоянного объема в среду с постоянным давлением при адиабатическом процессе. *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*. Т. 2. № 2. С. 84–95.
- Штереншлихт Д.В. 1984. Гидравлика: Учебник для вузов. Москва: Энергоатомиздат. 640 с.
- Adelstein E., Tran A., Munoz-Saez C. et al. 2014. Geyser preplay and eruption in a laboratory model with a bubble trap. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. 285. P. 129–135.
- Belousov A., Belousova M., Nechayev A. 2013. Video observations inside conduits of erupting geysers in Kamchatka, Russia, and their geological framework: Implications for the geyser mechanism. *Geology*. Vol. 41. P. 387–390.
- Bunsen R.W. 1847. Physikalische Beobachtungen uber die hauptsachlichsten Geysir Islands. *Annalen der Physik und Chemie*. Vol. 83. P. 159–170.
- Eibl E.P. et al. 2021. Eruptive cycle and bubble trap of Strokkur geyser, Iceland. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. Vol. 126 (4).
- Hurwitz S., Manga M. 2017. The fascinating and complex dynamics of geyser eruptions. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. Vol. 45. P. 31–59.
- Mackenzie G.S. 1811. Travels in the Island of Iceland, Edinburgh, Allam and Company. 27 p.

## REFERENCES

- Belousov A.B., Belousova M.G. 2014. How geysers work and why there are many of them in the Valley of Geysers? *Trudy Kronotskogo gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika (Proceedings of the Kronotsky State Natural Biosphere Reserve)*. Iss. 3. P. 142–151 (in Russian).
- Belousov A.B., Belousova M.G. 2024. Geysers are geothermal springs that can be used to set your watch. *Priroda (Nature)*. Vol. 9. P. 3–15 (in Russian).
- Droznin V.A., Razina A.A. 1977. On the nature of the geyser regime. In: *Hydrothermal process in areas of tectono-magmatic activity*. Moscow: Nauka Publ. P. 96–103 (in Russian).
- Nehoroshev A.S. 1959. On the question of the theory of geyser action. *Doklady Akademii nauk SSSR (Reports of the USSR Academy of Sciences)*. Vol. 127(5). P. 1096–1098 (in Russian).
- Nechaev A.M. 2012. On the mechanism of eruption of a geyser. *Trudy Kronotskogo gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika (Proceedings of the Kronotsky State Natural Biosphere Reserve)*. Vol. 2. P. 135–143 (in Russian).
- Tarasov V.V. 2016. Calculation of the ideal gas outflow time from the reservoir of constant volume into the environment with a constant pressure at an adiabatic process. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika (Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy)*. Vol. 2. № 2. P. 84–95 (in Russian).
- Shterenshlicht D.V. 1984. *Hydraulics: A textbook for universities*. Moscow: Energoatomizdat Publ. P. 640 (in Russian).

- Adelstein E., Tran A., Munoz-Saez C. et al. 2014. Geyser preplay and eruption in a laboratory model with a bubble trap. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. 285. P. 129–135.
- Belousov A., Belousova M., Nechayev A. 2013. Video observations inside conduits of erupting geysers in Kamchatka, Russia, and their geological framework: Implications for the geyser mechanism. *Geology*. Vol. 41. P. 387–390.
- Bunsen R.W. 1847. *Physikalische Beobachtungen uber die hauptsachlichsten Geysir Islands. Annalen der Physik und Chemie*. Vol. 83. P. 159–170.
- Eibl E.P. et al. 2021. Eruptive cycle and bubble trap of Strokkur geyser, Iceland. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. Vol. 126 (4).
- Hurwitz S., Manga M. 2017. The fascinating and complex dynamics of geyser eruptions. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. Vol. 45. P. 31–59.
- Mackenzie G.S. 1811. *Travels in the Island of Iceland*, Edinburgh, Allam and Company. 27 p.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Панов Всеволод Константинович** – Камчатский государственный технический университет; 683003, Россия, Петропавловск-Камчатский; доцент кафедры «Физика и высшая математика»; vspanov@yandex.ru. SPIN-код: 6782-9868, Author ID:107033.

**Panov Vsevolod Konstantinovich** – Kamchatka State Technical University; 683003, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Associate Professor of Physics and Higher Mathematics Chair; vspanov@yandex.ru; SPIN-code: 6782-9868, Author ID:107033.

**Белоусов Александр Борисович** – Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН; 682023, Россия, Петропавловск-Камчатский; кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник; belousov@mail.ru; SPIN-код: 7758-9723, Author ID: 58120; Scopus ID: 7102972684; ORCID: 0000-0003-1379-9256.

**Belousov Alexander Borisovich** – Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS; 682023, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher; belousov@mail.ru; SPIN-code: 7758-9723; Author ID: 58120; Scopus ID: 7102972684; ORCID: 0000-0003-1379-9256.

**Белоусова Марина Геннадьевна** – Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН; 682023, Россия, Петропавловск-Камчатский; кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник; harimkotan@gmail.com; SPIN-код: 8166-4155, Author ID:128089; Researcher ID: P-8988-2016; Scopus Author ID: 6603632576; ORCID: 0000-0001-5417-9972.

**Belousova Marina Gennadievna** – Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS; 682023, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher; harimkotan@gmail.com; SPIN-code: 8166-4155; Author ID: 128089; Researcher ID: P-8988-2016; Scopus Author ID: 6603632576; ORCID: 0000-0001-5417-9972.

Статья поступила в редакцию 25.11.2025; одобрена после рецензирования 03.03.2026; статья принята к публикации 21.05.2026.

The article was submitted 25.11.2025; approved after reviewing 03.03.2026; accepted for publication 21.05.2026.

Для цитирования: Панов В.К., Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. 2026. Экспериментальное моделирование периодичности в работе гейзера с питающей системой камерного типа. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. Вып. 76. С. 8–24. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2026-76-8-24>.

For citation: Panov V.K., Belousov A.B., Belousova M.G. 2026. Experimental simulation of periodicity in operation of geyser with chamber-type feed system. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta (Bulletin of Kamchatka State Technical University)*. Iss. 76. P. 8–24 (in Russian). <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2026-76-8-24>.

Научная статья

УДК 624.072.2

DOI: 10.17217/2079-0333-2026-76-25-40

## РАЗРАБОТКА УПРОЩЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ СТУПЕНЧАТЫХ СТОЕК

Царенко С.Н.<sup>1</sup>, Танасогло А.В.<sup>2</sup>, Голиков А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Камчатский государственный технический университет, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

В статье рассматривается задача о расчете на изгибные колебания стоек ступенчато-переменного сечения на основе модели эквивалентного упругого стержня. Стойки имеют ступенчатую жесткость, а за счет наличия оборудования – сложный характер распределения масс. Для выбора наиболее подходящей модели эквивалентного стержня рассмотрено три варианта. Первый вариант – классическая модель стержня с постоянной линейной плотностью и однородной изгибной жесткостью. Второй вариант – стержень с постоянной линейной плотностью и квадратичным законом изменения изгибной жесткости, которая также известна в литературе (модель решетчатой башни). Третий вариант – стержень с постоянной линейной плотностью и линейным законом изменения изгибной жесткости. Для третьего варианта уравнение для собственных функций имеет вид дифференциального уравнения с переменным коэффициентом, которое ранее не рассматривалось в литературе. Решение уравнения получено в виде степенных рядов, вид которых позволяет рассматривать любые граничные условия. Установлено, что лучшее приближение по частотам собственных колебаний дает модель с квадратичным изменением изгибной жесткости, а лучшую аппроксимацию изогнутой оси дает модель с линейной жесткостью.

**Ключевые слова:** изгибные колебания, метод Фурье, опоры двойного назначения, стержень переменного сечения, ступенчатый стержень, функции Бесселя.

Original article

## DEVELOPMENT OF A SIMPLIFIED MATHEMATICAL MODEL FOR STUDYING THE DYNAMICS OF BENDING VIBRATIONS OF STEP RACKS

Tsarenko S.N.<sup>1</sup>, Tanasoglo A.V.<sup>2</sup>, Golikov A.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Klyuchevskaya str., 35.

<sup>2</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Yaroslavl'skoe Hwy, 26.

The article considers the problem of calculating the bending vibrations of struts of stepwise-variable cross-section based on the model of an equivalent elastic rod. The racks have stepped rigidity, and due to the availability of equipment, the weight distribution is complex. Three options have been considered to select the most suitable equivalent rod model. The first option is a classical rod model with constant linear density and uniform bending stiffness. The second option is a rod with a constant linear density and a quadratic law

of bending stiffness variation, which is also known in the literature (the lattice tower model). The third option is a rod with a constant linear density and a linear law of bending stiffness variation. For the third variant, the equation for eigenfunctions has the form of a differential equation with a variable coefficient, which has not previously been considered in the literature. The solution of the equation is obtained in the form of power series, the form of which allows considering any boundary conditions. It is established that the best approximation in terms of natural oscillation frequencies is given by a model with a quadratic change in bending stiffness, and the best approximation of a curved axis is given by a model with linear rigidity.

**Key words:** bending vibrations, Fourier method, dual-purpose supports, rod of variable cross-section, stepped rod, Bessel functions.

## ВВЕДЕНИЕ

Среди многообразия типов башенных сооружений, детально описанных в научной литературе [Перельмутер, 2021; Горохов и др., 2010; Губанов, Голиков, 2011; Танасогло и др., 2017; Голиков, Михальчонок, 2019], наибольшее распространение в качестве опор транспортной инфраструктуры получили опоры двойного назначения. Опоры двойного назначения (ОДН) – это универсальные металлические конструкции, предназначенные для одновременного размещения на них оборудования для уличного освещения и устройств различного специализированного назначения, таких как антенны сотовой связи и другое телекоммуникационное оборудование. Сфера применения данных конструкций, их достоинства и недостатки описаны в работе Р.И. Микулич, Е.П. Вишнякова [Сотовая связь...].

В соответствии с устоявшейся практикой проектирования, исходя из критерия соотношения геометрических параметров сооружения, ОДН относятся к высотным сооружениям [Соколов, 1971]. Для установки в плотной городской застройке разработаны два принципиальных типа сплошностенчатых опор: из трубчатых секций ступенчато-переменного сечения и в виде многогранной сплошностенчатой оболочки переменного поперечного сече-

ния по длине, уменьшающегося от низа к верху. Широкое распространение в практике получили опоры со стволом из труб.

Основной нагрузкой на высотные сооружения является нагрузка от веса конструкций и веса оборудования, ветровая и сейсмическая нагрузка [Мельников, 1969].

К технологическому оборудованию сетей мобильной связи относят:

- антенны для базовых станций сотовой связи (KADAMM, Kathrein и др.);
- антенны РРЛ (радиорелейных линий) диапазона сверхвысоких и крайне высоких частот;
- элементы фидерного тракта базовых станций сотовой связи.

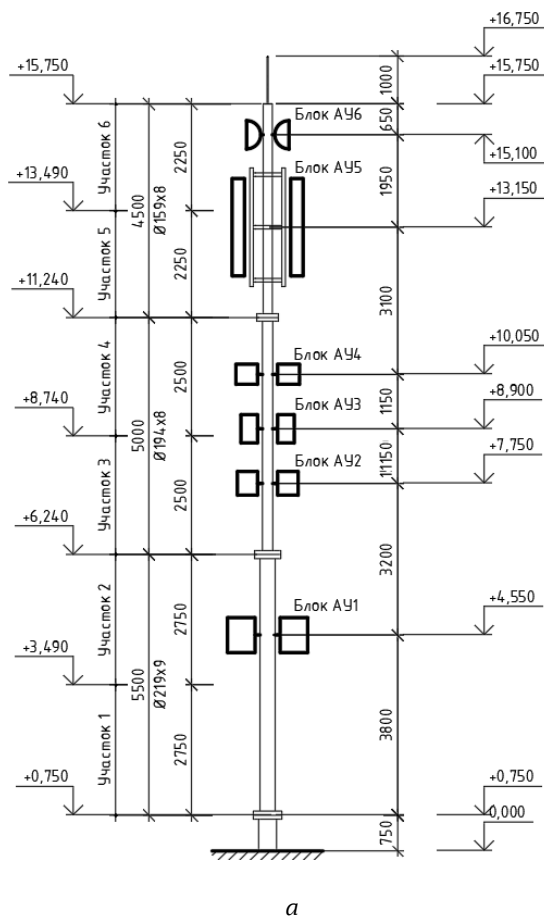
Типовая схема расположения технологического оборудования по высоте опоры приведена на рисунке 1.

Определяющее влияние на работу опор оказывает ветровая нагрузка [Павловский, Кондра, 1979], а для сейсмоактивных регионов – сейсмическая. В СП 20.13330.2016 (Свод правил. Нагрузки и воздействия) даются указания по расчету аэродинамического коэффициента для отдельных конструкций и конструктивных элементов, однако отсутствуют указания по назначению аэродинамического коэффициента на группу блоков оборудования. Для достоверной оценки действительных значений аэродинамических коэффициентов группы блоков оборудования следует выполнять

модельные натурные или численные эксперименты, что существенно усложняет процесс расчета сооружений. Численные исследования изменения значений аэродинамических коэффициентов группы блоков оборудования представлены в работе [Белаш, Сафин, 2024]. Анализ результатов данной публикации показал, что значение аэродинамического коэффициента в зависимости от вылета антенны от центральной стойки опоры варьируется в диапазоне от 0,8 до 1,4. За годы развития сотовой связи разработаны сотни унифицированных опор для различных высот сооружения (например, см. рис. 2).

Камчатский край относится к регионам с наиболее сложными климатическими

и сейсмическими условиями (СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия). Проект стратегии развития Камчатского края до 2035 года предполагает «формирование современной информационной и телекоммуникационной инфраструктуры, предоставление на ее основе качественных услуг и обеспечение высокого уровня доступности для населения информации и технологий», что также предполагает расширение покрытия сетей мобильной связи. При модернизации и установке нового оборудования могут задействоваться в том числе осветительные опоры. Телекоммуникационное оборудование влияет как на аэродинамический коэффициент, так и на инерционные характеристики конструкции.



а

Ведомость оборудования

Марка оборудования	Размеры, мм			Кол-во	Вес 1 блока, кг	Примечание
	Высота	Ширина	Толщина			
АУ6	Ø	600		2	20	Антенны с РРС рад.мод.
АУ5	2100	400	200	3	34	Секторные антенны
АУ4	420	460	130	3	24	Передачки 2G
АУ3	600	350	110	3	20	Передачки 3G
АУ2	500	430	180	3	23	Передачки 4G
АУ1	740	580	580	2	155	Система питания

б

Рис. 1. Типовая схема размещения оборудования на конструкции ОДН: а – схема размещения на опоре; б – характеристика оборудования

Fig. 1. A typical scheme of equipment placement on a dual-use support structure: а – scheme of placement on a support; б – characteristics of the equipment

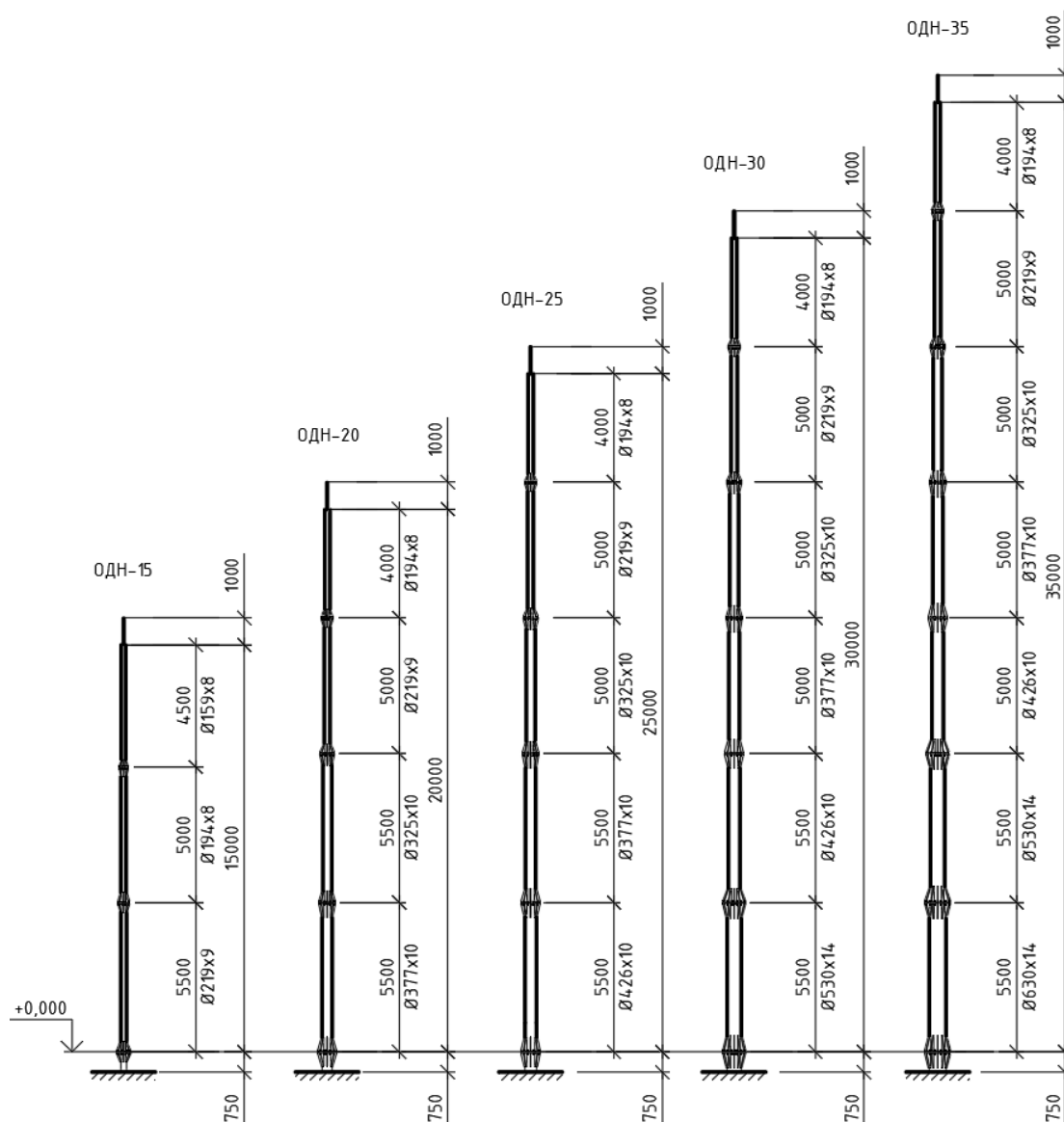


Рис. 2. Линейка типовых опор (ООО «Элмашпром») высотой от 15,0 до 35,0 м

Fig. 2. A range of standard supports (LLC “Elmashprom”) in height from 15.0 to 35.0 m

Исследование динамики изгибных колебаний многоступенчатых стержней на основе аналитической модели является трудоемкой задачей, поэтому практические расчеты в основном выполняют в программных комплексах на базе метода конечных элементов [Сухарев и др., 2021]. Данный подход имеет свои недостатки: под каждую конструкцию опоры и компоновку оборудования требуется отдельная твердотельная модель; программные комплексы, реализующие алго-

ритмы метода конечных элементов имеют дорогостоящую лицензию; качество расчета определяется квалификацией пользователя. С другой стороны, в классической теории расчета [Тимошенко, 1959; Шевченко, 1999] получили развитие различного рода приближенные и упрощенные подходы.

Целью данной работы является рассмотрение возможности использования аналитических моделей изгибных колебаний стержней для исследования динамики



Рассмотрим возможность замены ступенчатого стержня эквивалентным. Для расчета высотных сооружений предварительно необходимо определить значения и формы первых частот колебаний, как правило, трех, т. е. модель невесомого стержня с сосредоточенной массой не подходит. Предварительно проанализируем характер распределения изгибной жесткости и линейной плотности по длине конструкции, при этом в отличие от метода конечных элементов, где масса сосредоточивалась в узлах, будем равномерно ее распределять по длине участков.

На рисунке 4, а представлена диаграмма изменения линейной плотности, начало отсчета принято со стороны свободного конца. Характер диаграммы во многом определяется не конструкцией опоры, а распределением навесного оборудования, таким образом, невозможно установить какую-либо определенную зависимость для линейной плотности по длине, поэтому ограничимся моделями с равномерным распределением массы. Усредненное значение плотности на графике (рис. 4, а) представлено штрихпунктирной линией.

На рисунке 4, б представлена диаграмма изменения изгибной жесткости опоры. В этом случае наглядно видно постоянное увеличение жесткости от свобод-

ного конца к заделке. К данной ситуации можно применить три модели:

- постоянное сечение с усредненной жесткостью – штрихпунктирная линия (рис. 4, б);
- линейная аппроксимация изгибной жесткости – прямая 1 (рис. 4, б);
- квадратичная аппроксимация изгибной жесткости – кривая 2 (рис. 4, б).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### *Стержень с равномерной линейной плотностью и постоянной изгибной жесткостью*

Данная модель является наиболее распространенной в инженерной практике и широко представлена в литературе [Тимошенко, 1959; Шевченко, 1999]. Уравнение изгибных колебаний имеет вид:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = p(x, t), \quad (1)$$

- где  $EJ = \text{const}$  – изгибная жесткость стержня;
- $y$  – поперечные перемещения;
- $x$  – продольная координата;
- $t$  – время;
- $m$  – линейная плотность;
- $p(x, t)$  – интенсивность распределенной нагрузки.

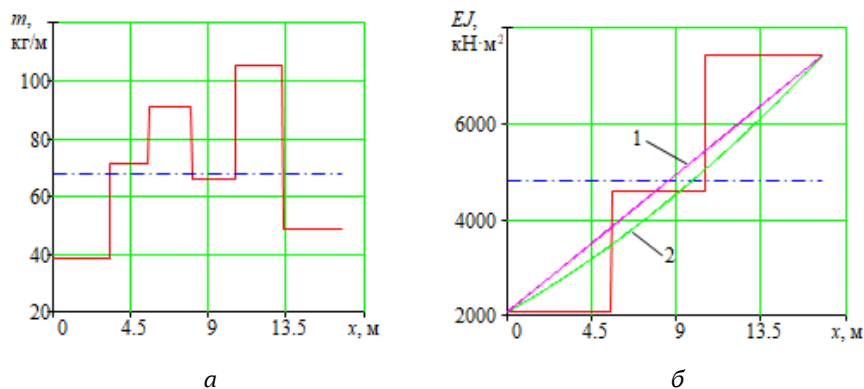


Рис. 4. Изменение характеристик ступенчатой стойки по длине: а – диаграмма изменения линейной плотности; б – диаграмма изменения изгибной жесткости

Fig. 4. Change in the characteristics of a stepped rack along its length: а – diagram of changes in linear density; б – diagram of changes in bending stiffness

После разделения переменных по методу Фурье уравнение для собственных функций можно привести к виду:

$$\frac{\partial^4 y}{\partial \xi^4} - \lambda^4 y = 0, \quad (2)$$

где  $\xi = x/l$  – относительная продольная координата,  $l$  – длина стержня;

$\lambda$  – собственные значения рассматриваемой граничной задачи.

Уравнение прогибов по методу начальных параметров представляется в виде [Шевченко, 1999]

$$y = y_0 A_{\epsilon\lambda} + \frac{\theta_0 l}{\lambda} B_{\epsilon\lambda} + \frac{M_0 l^2}{EJ\lambda^2} C_{\epsilon\lambda} + \frac{P_0 l^3}{EJ\lambda^3} D_{\epsilon\lambda}, \quad (3)$$

где  $A_{\lambda\xi}$ ,  $B_{\lambda\xi}$ ,  $C_{\lambda\xi}$ ,  $D_{\lambda\xi}$  – динамические функции Крылова [Шевченко, 1999]:

$$A_{\lambda\xi} = \frac{\text{ch}\lambda\xi + \cos\lambda\xi}{2}; B_{\lambda\xi} = \frac{\text{sh}\lambda\xi + \sin\lambda\xi}{2};$$

$$C_{\lambda\xi} = \frac{\text{ch}\lambda\xi - \cos\lambda\xi}{2}; D_{\lambda\xi} = \frac{\text{sh}\lambda\xi - \sin\lambda\xi}{2}; \quad (4)$$

где  $y_0$ ,  $\theta_0$ ,  $M_0$ ,  $P_0$  – начальные параметры, соответственно: прогиб, угол поворота, момент и поперечная сила в нулевом сечении ( $\xi = 0$ ). Три из четырех параметров должны удовлетворять граничным условиям закрепления стержня, для случая консольной конструкции:

$$y(1) = 0; y'(1) = 0;$$

$$EJy''(0) = 0; EJy'''(0) = 0. \quad (5)$$

Из четвертого условия находится спектр собственных значений  $\lambda_n$ , первые три значения и соответствующие им частоты представлены в таблице 1. Собственные круговые частоты колебаний определяются по формуле:

$$\omega_n = \frac{\lambda_n^2}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}. \quad (6)$$

Для расчета собственных частот опоры (рис. 1, а) приняты усредненные значения линейной плотности  $m = 67,6$  кг/м (рис. 4, а) и изгибной жесткости  $EJ = 4\,818$  кН·м<sup>2</sup> (рис. 4, б).

Таблица 1. Собственные значения и круговые частоты

Table 1. Eigenvalues and circular frequencies

Модель	№ формы $n$	Собственные значения $\lambda_n$	Круговая частота $\omega_n$ , рад/с	Расхождение значений по частоте $\Delta\omega_n$ , %
ЛИРА-САПР	1	-	3,653	-
	2	-	17,588	-
	3	-	40,902	-
$EJ = \text{const}$	1	1,875	3,345	8,4
	2	4,694	20,967	19,2
	3	7,855	58,714	43,5
$EJ = EJ_2 z^2$	1	1,771	3,706	2,1
	2	4,149	20,334	17,3
	3	6,798	54,593	35,8
$EJ = EJ_2 z$	1	1,796	3,811	4,3
	2	4,252	21,359	21,4
	3	6,977	57,497	40,6

**Стержень с равномерной линейной плотностью и квадратичным законом изменения изгибной жесткости**

Данная модель использовалась для исследования динамики решетчатых башен [Улитин, Царенко, 2015; Царенко, 2018]. Частные задачи рассматривались еще в трудах академика А.Н. Динника [Динник, 1955], но более общий подход к решению схемы с произвольными граничными условиями предложен в статье [Царенко, 2018].

Уравнение колебаний имеет вид аналогичный (1), где изгибная жесткость имеет квадратичную зависимость от продольной координаты:

$$EJ = EJ_2 z^2; z = (1-k)\frac{x}{l} + k; k = \sqrt{EJ_1 / EJ_2}, \quad (7)$$

где  $EJ_1, EJ_2$  – изгибные жесткости в верхнем и нижнем сечениях соответственно.

Уравнение для собственных функций имеет вид [Царенко, 2018]:

$$z^2 \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} + 4z \frac{\partial^3 y}{\partial z^3} + 2z \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} - \frac{\tilde{\lambda}^4}{16} y = 0. \quad (8)$$

Решение уравнения (8) в начальных параметрах имеет вид [Царенко, 2018]:

$$y = y_0 A_{\tilde{\lambda}\zeta} + \theta_0 \zeta_0 \frac{2l}{\tilde{\lambda}(1-k)} \left( C_{\tilde{\lambda}\zeta} + \frac{2}{\tilde{\lambda}\zeta_0} B_{\tilde{\lambda}\zeta} \right) + \frac{M_0}{\zeta_0^2 EJ_2} \left( \frac{2l}{\tilde{\lambda}(1-k)} \right)^2 B_{\tilde{\lambda}\zeta} + \frac{P_0}{\zeta_0 EJ_2} \left( \frac{2l}{\tilde{\lambda}(1-k)} \right)^3 D_{\tilde{\lambda}\zeta}, \quad (9)$$

где функции  $A_{\tilde{\lambda}\zeta}, B_{\tilde{\lambda}\zeta}, C_{\tilde{\lambda}\zeta}, D_{\tilde{\lambda}\zeta}$  имеют тот же смысл, что и функции Крылова (4), но другое представление:

$$\begin{aligned} A_{\tilde{\lambda}\zeta} &= \frac{1}{4} \tilde{\lambda} \zeta_0 [2(I_0(\tilde{\lambda}\zeta)K_1(\tilde{\lambda}\zeta_0) + K_0(\tilde{\lambda}\zeta)I_1(\tilde{\lambda}\zeta_0)) - \\ &\quad - \pi(J_0(\tilde{\lambda}\zeta)Y_1(\tilde{\lambda}\zeta_0) - Y_0(\tilde{\lambda}\zeta)J_1(\tilde{\lambda}\zeta_0))]; \\ B_{\tilde{\lambda}\zeta} &= \frac{1}{4} \tilde{\lambda} \zeta_0 [2(I_0(\tilde{\lambda}\zeta)K_1(\tilde{\lambda}\zeta_0) + K_0(\tilde{\lambda}\zeta)I_1(\tilde{\lambda}\zeta_0)) + \\ &\quad + \pi(J_0(\tilde{\lambda}\zeta)Y_1(\tilde{\lambda}\zeta_0) - Y_0(\tilde{\lambda}\zeta)J_1(\tilde{\lambda}\zeta_0))]; \\ C_{\tilde{\lambda}\zeta} &= \frac{1}{4} \tilde{\lambda} \zeta_0 [2(I_0(\tilde{\lambda}\zeta)K_1(\tilde{\lambda}\zeta_0) - K_0(\tilde{\lambda}\zeta)I_1(\tilde{\lambda}\zeta_0)) - \\ &\quad - \pi(J_0(\tilde{\lambda}\zeta)Y_1(\tilde{\lambda}\zeta_0) - Y_0(\tilde{\lambda}\zeta)J_1(\tilde{\lambda}\zeta_0))]; \\ D_{\tilde{\lambda}\zeta} &= \frac{1}{4} \tilde{\lambda} \zeta_0 [2(I_0(\tilde{\lambda}\zeta)K_1(\tilde{\lambda}\zeta_0) - K_0(\tilde{\lambda}\zeta)I_1(\tilde{\lambda}\zeta_0)) + \\ &\quad + \pi(J_0(\tilde{\lambda}\zeta)Y_1(\tilde{\lambda}\zeta_0) - Y_0(\tilde{\lambda}\zeta)J_1(\tilde{\lambda}\zeta_0))], \quad (10) \end{aligned}$$

здесь  $\zeta = \sqrt{z}, \zeta_0 = \sqrt{k}, J_n, Y_n$  – функции Бесселя первого и второго рода;

$I_n, K_n$  – модифицированные функции Бесселя первого и второго рода.

Граничные условия (5) для принятых обозначений принимают вид

$$\begin{aligned} y(1) = 0; y'(1) = 0; EJy''(\zeta_0) = 0; \\ (EJ\zeta y'')\big|_{\zeta=\zeta_0} = 0. \quad (11) \end{aligned}$$

Принцип расчета такой же, как и для однородного стержня. Собственные частоты можно найти по формуле (6), если заменить  $EJ$  на  $EJ_2$ , а  $\lambda$  определяется зависимостью  $\lambda = \tilde{\lambda}(1-k) / 2$ .

Для расчета частот приняты значения:  $EJ_1 = 2\,526 \text{ кН}\cdot\text{м}^2; EJ_2 = 7\,424 \text{ кН}\cdot\text{м}^2$  (см. рис. 4, б);  $k = 0,528$ . Результаты расчета по данной модели приведены в таблице 1.

**Стержень с равномерной линейной плотностью и линейным законом изменения изгибной жесткости**

Такая модель ранее в литературе не рассматривалась, поэтому для данного случая подробно изложим вывод расчетных зависимостей.

Уравнение колебаний, как и в двух предыдущих случаях, имеет вид (1), где

изгибная жесткость имеет линейную зависимость от продольной координаты:

$$EJ = EJ_2 z; z = (1 - k) \frac{x}{l} + k; k = EJ_1 / EJ_2. \quad (12)$$

В этом случае уравнение для собственных функций примет вид

$$z \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} + 2 \frac{\partial^3 y}{\partial z^3} - \tilde{\lambda}^3 y = 0. \quad (13)$$

В справочной литературе [Камке, 1976; Полянин, Зайцев, 2001] решение уравнения (13) не представлено. Решение будем искать по аналогии с задачей, рассмотренной в статье [Улитин, Царенко, 2017].

Выполним замену переменных  $\xi = \tilde{\lambda} z$ , тогда уравнение (13) примет вид

$$\xi \frac{\partial^4 y}{\partial \xi^4} + 2 \frac{\partial^3 y}{\partial \xi^3} - y = 0. \quad (14)$$

Решение уравнения (14) возьмем в виде ряда

$$\sum_{n=0}^{\infty} c_n \xi^{\alpha+n}. \quad (15)$$

Подставляя ряд (15) в уравнение (14), получим

$$L \sum_{n=0}^{\infty} c_n \xi^{\alpha+n} = \sum_{n=0}^{\infty} c_n (\alpha+n)(\alpha+n-1)^2 \times (\alpha+n-2) \xi^{\alpha+n} - \sum_{n=0}^{\infty} c_n \xi^{\alpha+n+3}, \quad (16)$$

где  $L = \xi \frac{\partial^4}{\partial \xi^4} + 2 \frac{\partial^3}{\partial \xi^3} - 1$  - дифференциальный оператор.

Выражение справа будет равно нулевому члену ряда, а именно  $c_0 \alpha(\alpha-1)^2(\alpha-2)\xi^\alpha$ ,

если коэффициенты  $c_n$  подберем таким образом, чтобы в обоих рядах справа совпали множители при соответствующих степенях  $\xi$ . В результате такого выбора получим систему уравнений

$$\begin{cases} c_1(\alpha+1)\alpha^2(\alpha-1) = 0; \\ c_2(\alpha+2)(\alpha+1)^2(\alpha-1) = 0; \\ c_3(\alpha+3)(\alpha+2)^2(\alpha+1) - c_0 = 0; \\ \dots\dots\dots \\ c_n(\alpha+n)(\alpha+n-1)^2(\alpha+n-2) - c_{n-3} = 0; \\ \dots\dots\dots \end{cases} \quad (17)$$

Приняв  $c_1 = 0$  и  $c_2 = 0$ , получим

$$L \sum_{n=0}^{\infty} c_n \xi^{\alpha+n} = c_0 \alpha(\alpha-1)^2(\alpha-2)\xi^\alpha. \quad (18)$$

Отсюда видно, что ряд (15) может стать решением уравнения (14) только при значениях  $\alpha = 0; 1; 2$ . Таким образом, из системы (17) следует, что для всех  $nc_n = 0$ , если  $n \neq 3j (j \in N)$ , а  $c_{3n}$  выражается через нулевой коэффициент:

$$c_{3n} = \frac{c_0}{\prod_{j=1}^n (\alpha+3j-1)^2 ((\alpha+3j-1)^2 - 1)}. \quad (19)$$

Тогда система уравнений (17) будет удовлетворена при значениях  $\alpha = 0; 1; 2$ , а решением уравнения (14) будет функция

$$U_\alpha(\xi) = \xi^\alpha \left( 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \xi^{3n} / \prod_{j=1}^n (\alpha+3j-1)^2 \times ((\alpha+3j-1)^2 - 1) \right). \quad (20)$$

Таким образом, подставляя в зависимость (20) ранее определенные значения  $\alpha$ , получим три функции, которые являются линейно независимыми решениями уравнения (14). Выражение (20) можно представить в виде

$$U_\alpha(\xi) = \sum_{n=1}^{\infty} (\xi/3)^{\alpha+3n} / \left( 3^n \Gamma\left(n + \frac{\alpha-1}{3} + 1\right) \right)^2 \times \Gamma\left(n + \frac{\alpha}{3} + 1\right) \Gamma\left(n + \frac{\alpha-2}{3} + 1\right), \quad (21)$$

где  $\Gamma(z)$  – гамма-функция.

Для поиска четвертого решения уравнения (14) рассмотрим вронскиан фундаментальной системы решений, который для нашего случая примет вид [Камке, 1976]:

$$W(U_0, U_1, U_2, V) = -C \frac{1}{\xi^2}. \quad (22)$$

Из (22) следует, что хотя бы одно из решений должно содержать функцию  $\xi \ln \xi$  или ее производные. Возьмем решение уравнения (14) в виде ряда

$$\sum_{n=0}^{\infty} c_n \xi^{\alpha+n} (\ln \xi + \beta_n). \quad (23)$$

Подставляя ряд (23) в уравнение (14), получим

$$L \sum_{n=0}^{\infty} c_n \xi^{\alpha+n} (\ln \xi + \beta_n) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n (\alpha+n) \times (\alpha+n-1)^2 (\alpha+n-2) \xi^{\alpha+n} \times \left( \ln \xi + \frac{4(\alpha+n)^2 - 8(\alpha+n) + 2}{(\alpha+n)(\alpha+n-1)(\alpha+n-2)} + \beta_n \right) - \sum_{n=0}^{\infty} c_n \xi^{\alpha+n+3} (\ln \xi + \beta_n). \quad (24)$$

Определим коэффициенты  $\beta_n$  так, чтобы в обоих рядах справа совпали множители при соответствующих степенях  $\xi$  в членах, которые не содержат логарифм. Таким образом, для  $\beta_n$  получим рекуррентную зависимость:

$$\beta_n = \beta_{n-3} - \frac{4(\alpha+n)^2 - 8(\alpha+n) + 2}{(\alpha+n)(\alpha+n-1)(\alpha+n-2)}. \quad (25)$$

Примем  $\beta_0 = 0$ , тогда уравнение (24) примет вид

$$L \sum_{n=0}^{\infty} c_n \xi^{\alpha+n} (\ln \xi + \beta_n) = c_0 \xi^\alpha (\alpha(\alpha-1)^2 \times (\alpha-2) \ln \xi + (\alpha-1)(4\alpha^2 - 8\alpha + 2)). \quad (26)$$

Из зависимости (26) следует, что ряд (23) может быть решением уравнения (14) только при значении  $\alpha = 1$ . Произвольные значения коэффициентов  $c_n$  определяются так же, как и в предыдущем случае, и для значения  $\alpha = 1$  принимают вид

$$c_{3n} = \frac{c_0}{\prod_{j=1}^n (3j)^2 ((3j)^2 - 1)}. \quad (27)$$

Таким образом, с учетом выражений (25) и (27) получаем четвертое решение для уравнения (14):

$$V(\xi) = \xi \ln \xi + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi^{3n}}{\prod_{j=1}^n (3j)^2 ((3j)^2 - 1)} \times \left( \ln \xi - \sum_{j=1}^n \frac{4(3j)^2 - 2}{3j((3j)^2 - 1)} \right). \quad (28)$$

Тогда общее решение однородного уравнения (4) для собственных функций можно представить в виде

$$y = C_1 U_0(\tilde{\lambda}z) + C_2 U_1(\tilde{\lambda}z) + C_3 U_2(\tilde{\lambda}z) + C_4 V(\tilde{\lambda}z), \quad (29)$$

где  $C_i$ , ( $i = 1, \dots, 4$ ), – произвольные постоянные, для консольной конструкции определяются из граничных условий:

$$y(1) = 0; y'(1) = 0;$$

$$EJy''(k) = 0; (EJzy''')|_{z=k} = 0. \quad (30)$$

Собственные частоты находятся по формуле (6), где  $EJ$  заменяется на  $EJ_2$ , а собственные значения -  $\lambda = \tilde{\lambda}^{3/4}(1-k)$ . Результаты расчета сведены в таблице 1.

На графиках рисунка 5, *a* - *в* представлены первые три собственные формы колебаний, построенные по зависимости (29). Как видно, формы по внешнему виду хорошо согласуются с результатами моделирования методом конечных элементов (рис. 3, *в*, *з*).

В таблице 2 представлены результаты расчетов перемещений по узлам рассматриваемых форм, полученные в программном комплексе ЛИРА и с использованием

аналитических моделей. Оценку аппроксимации форм изгиба приближенных решений выполним путем сравнения среднеквадратических отклонений:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{узл}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{узл}}} (\tilde{y}_{\text{пр}}(z_i) - \tilde{y}_{Li})^2}, \quad (31)$$

где  $N_{\text{узл}}$  - количество узловых точек, для которых выполнен расчет в программном комплексе ЛИРА;

$\tilde{y}_{Li} = y_{Li} / y_{L\text{max}}$  - относительное перемещение  $i$ -го узла по результатам расчета методом конечных элементов;

$\tilde{y}_{\text{пр}}(z_i) = y_{\text{пр}}(z_i) / y_{\text{max}}$  - перемещение  $i$ -го узла, рассчитанное по приближенным схемам.

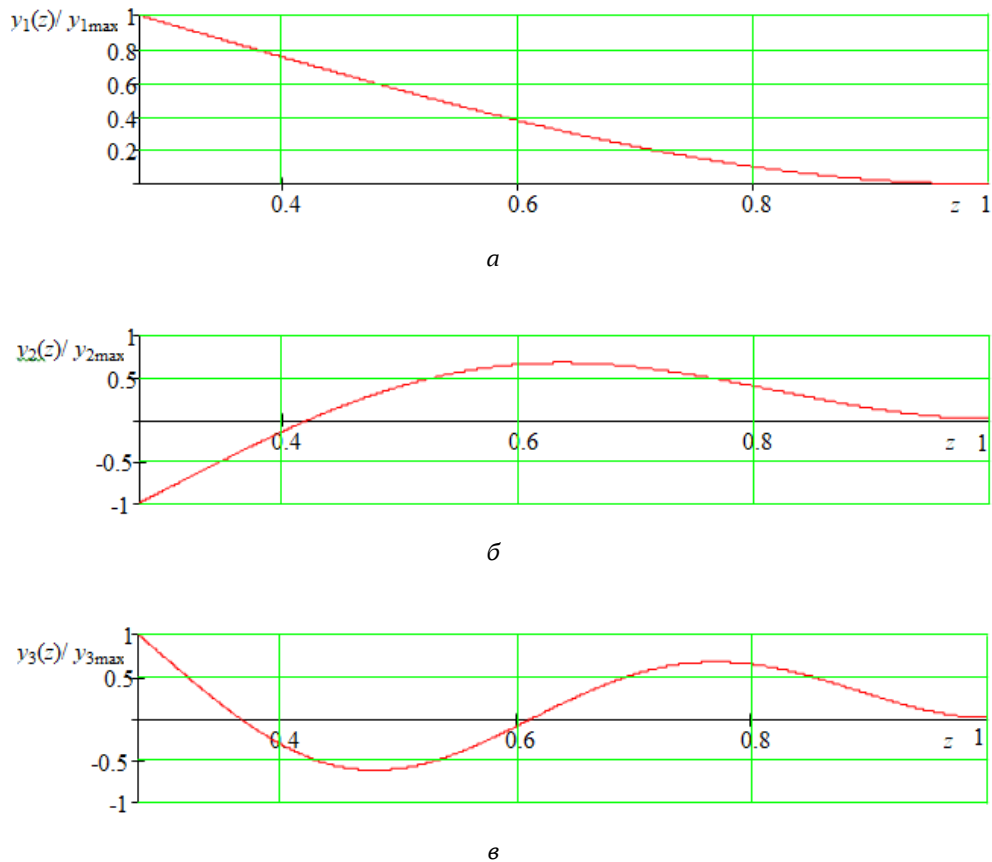


Рис. 5. Относительные прогибы стержня с линейным законом изменения изгибной жесткости: *a* - первая собственная форма; *б* - вторая форма; *в* - третья форма

Fig. 5. Relative displacements of a rod with a linear law of bending stiffness change: *a* - the first proper shape; *б* - the second shape; *в* - the third shape

По результатам обработки данных таблицы 1 видно, что лучшее приближение по частотам дает модель с квадратичным законом изменения жесткости. Лучшую аппроксимацию формы изогнутой оси (табл. 2) имеет модель с линейным изменением изгибной жесткости.

### ОБСУЖДЕНИЕ

Упрощенные модели дают хорошее приближение лишь по первой форме, для второй и третьей форм расхождения существенное. Однако необходимо иметь в виду, что нельзя сделать окончательный вывод о непригодности приближенных методик только на основе анализа лишь одной конструктивной схемы. В перспективе необходимо рассмотреть ряд типовых конструкций опор, а также провести исследования влияния на собственные формы размера сетки, используемой в методе конечных элементов. Для дальнейшего развития теоретических моделей следует рассмотреть схему с переменной координатой сосредоточенной массы.

Полученные для третьей модели решения в рядах (21) и (28) имеют плохую сходимость для больших значений аргу-

мента, поэтому на практике их можно использовать только для расчета нескольких первых форм и частот. Для расширения возможностей применения данной модели требуется исследование на асимптотическое поведение функций (21) и (28).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что упрощенные модели консольного стержня хорошо аппроксимируют лишь первую собственную форму колебаний, для более высоких форм требуются дополнительные исследования, как в направлении наполнения базы исходных данных расчетов типовых схем методом конечных элементов, так и в развитии теоретических моделей. На основе исследования аналитических решений можно резюмировать, что переменная жесткость весьма ограничено влияет на значения собственных чисел  $\lambda_n$ , таким образом, при установке нового оборудования или его модернизации можно примерно оценить пределы изменения собственных частот по формуле (6). Аналитические модели можно также использовать для верификации решений, полученных методом конечных элементов.

Таблица 2. Относительные перемещения узловых точек

Table 2. Relative displacements of nodal points

Модель	Относительная координата $\xi(z)$ / перемещение $\tilde{y}$	№ формы $n$	№ узла									Средне-квадратическое отклонение $s$
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	
ЛИРА-САПР	$\xi$	-	0	0,06	0,194	0,328	0,478	0,627	0,791	0,955	1	-
		1	1	0,913	0,719	0,531	0,342	0,185	0,064	0,003	0	-
	$\tilde{y}$	2	1	0,77	0,268	-0,12	-0,333	-0,325	-0,156	-0,009	0	-
		3	1	0,66	-0,03	-0,292	-0,037	0,236	0,214	0,017	0	-
$EJ = \text{const}$	$\xi$	-	0	0,06	0,194	0,328	0,478	0,627	0,791	0,955	1	-
		1	1	0,918	0,734	0,553	0,366	0,203	0,069	0,003	0	0,014
	$\tilde{y}$	2	1	0,715	0,096	-0,408	-0,7	-0,652	-0,322	-0,021	0	0,207
		3	1	0,533	-0,366	-0,649	-0,104	0,624	0,631	0,055	0	0,255

Окончание табл. 2

The End of the Table 2

Модель	Относительная координата $\xi(z)$ / перемещение $\tilde{y}$	№ формы $n$	№ узла									Средне-квадратическое отклонение $s$
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$EJ = EJ_2z^2$	$z$	-	0,528	0,556	0,619	0,683	0,753	0,824	0,901	0,979	1	-
	$\tilde{y}$	1	1	0,911	0,713	0,524	0,333	0,177	0,058	0,003	0	0,005
		2	1	0,689	0,03	-0,454	-0,667	-0,556	-0,247	-0,014	0	0,197
		3	1	0,478	-0,449	-0,57	0,076	0,633	0,493	0,037	0	0,244
$EJ = EJ_2z$	$z$	-	0,278	0,321	0,418	0,515	0,623	0,731	0,849	0,968	1	-
	$\tilde{y}$	1	1	0,912	0,716	0,528	0,338	0,181	0,06	0,003	0	0,003
		2	1	0,69	0,035	-0,447	-0,665	-0,562	-0,253	-0,015	0	0,195
		3	1	0,479	-0,443	-0,57	0,062	0,624	0,499	0,038	0	0,241

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

- Белаш Т.А., Сафин Р.Р. 2024. Моделирование ветровой нагрузки для анализа аэродинамики опор двойного назначения с антеннами, установленными на них. *Вестник НИЦ «Строительство»*. Т. 41. № 2. С. 18–28. URL: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-18-28](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-18-28) (дата обращения: 21.09.2025).
- Голиков А.В., Михальчонок Е.А. 2019. Определение рациональной конструктивной формы башен сотовой связи. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. Т. 20. № 2. С. 163–173. DOI: <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-163-173>
- Горохов Е.В., Васылев В.Н., Алехин А.М., Ягмур А.А. 2010. Анализ конструктивной формы антенных опор радиорелейной связи. *Металлические конструкции*. Т. 16. № 1. С. 41–50. URL: [https://donnasa.ru/publish\\_house/journals/mk/2010-1/04\\_gorohov\\_vasylev\\_alehin\\_yagmur.pdf](https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2010-1/04_gorohov_vasylev_alehin_yagmur.pdf) (дата обращения: 21.09.2025)
- Губанов В.В., Голиков А.В. 2011. Особенности проектирования дымовых труб с жесткими подкосами. *Металлические конструкции*. Т. 17. № 2. С. 115–122. URL: [https://donnasa.ru/publish\\_house/journals/mk/2011-2/05\\_gubanov\\_golikov.pdf](https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2011-2/05_gubanov_golikov.pdf) (дата обращения: 21.09.2025).
- Динник А.Н. 1955. Избранные труды. Т. 2. Приложение функций Бесселя к задачам теории упругости. Киев: Изд-во АН УССР. 220 с.
- Камке Э. 1976. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. Москва: Наука. 576 с.
- Мельников Н.П. 1969. Антенные сооружения. Москва: Знание. 47 с.
- Павловский В.Ф., Кондра М.П. 1979. Стальные башни: проектирование и монтаж. Киев: Будівельник. 200 с.
- Перельмутер А.В. 2021. Становление и развитие ключевых идей проектирования высотных конструкций антенных сооружений. *Промышленное и гражданское строительство*. № 1. С. 10–20. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.01.10-20

- Полянин А.Д., Зайцев В.Ф. 2001. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. Москва: Физматлит. 576 с.
- Соколов А.Г. 1971. Металлические конструкции антенных устройств. Москва: Стройиздат, 240 с.
- Сотовая связь. История. Стандарты. Технологии. URL: <http://celnet.ru/gal49.php> (дата обращения: 09.08.2025)
- Сухарев Ф.И., Иваненко Н.А., Семёнов С.Ю. 2021. Реакция здания с кинематической системой сейсмоизоляции на ветровое воздействие и ее анализ средствами ЛИРА-САПР. *ИВД*. № 1 (73). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/reaktsiya-zdaniya-s-kinematicheskoy-sistemoy-seysmoizolyatsii-na-etrovoe-vozdeystvie-i-eyo-analiz-sredstvami-lira-sapr> (дата обращения: 23.01.2026).
- Танасогло А.В., Бакаев С.Н., Волчков А.Н. и др. 2017. Новое проектное решение антенной опоры для стесненных городских условий. *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. № 3 (125). С. 50–54. URL: [https://donnasa.ru/publish\\_house/journals/vestnik/2017/2017-3\(125\)/st\\_09\\_tanasoglo\\_bakaev\\_volchkov\\_bakaeva\\_perevaryuha.pdf](https://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2017/2017-3(125)/st_09_tanasoglo_bakaev_volchkov_bakaeva_perevaryuha.pdf) (дата обращения: 21.09.2025).
- Тимошенко С.П. 1959. Колебания в инженерном деле. Москва: Физматгиз. 440 с.
- Улитин Г.М., Царенко С.Н. 2015. Изгибные колебания стержня с переменной жесткостью и распределенной массой. *Прикладная математика и механика*. № 6. С. 817–823.
- Улитин Г.М., Царенко С.Н. 2017. Изгибные колебания упругого стержня с переменной жесткостью сжатого продольной силой. *Журнал теоретической и прикладной механики*. № 2 (59). С. 19–26.
- Царенко С.Н. 2018. Динамика изгибных колебаний конструкций с осевой неоднородностью геометрических характеристик. *Строительная механика и расчет сооружений*. № 3 (278). С. 48–54.
- Шевченко Ф.Л. 1999. Динамика упругих стержневых систем. Донецк: ДонГТУ. 268 с.

## REFERENCES

- Belash T.A., Safin R.R. 2024. Wind load simulation for the analysis of the antenna dual-purpose poles aerodynamics. *Vestnik NIC Stroitelstvo (Bulletin of Science and Research Center of Construction)*. Vol. 41. № 2. P. 18–28. URL: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-18-28](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-18-28) (accessed: 21.09.2025) (in Russian).
- Golikov A.V., Mikhailchonok E.A. 2019. Determination of the rational constructive form of cellular communication towers. *Vestnik rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya Inzhenernye issledovaniya (RUDN Journal of Engineering Researches)*. Vol. 20. № 2. P. 163–173. DOI: <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-163-173> (in Russian).
- Gorokhov Ye.V., Vasylev V.N., Alyokhin A.M., Yagmur A.A. 2010. Analysis of the constructive form of the radio-relay communication antenna supports. *Metallicheskie konstruksii (Metal Constructions)* Vol. 16. № 1. P. 41–50. URL: [https://donnasa.ru/publish\\_house/journals/mk/2010-1/04\\_gorokhov\\_vasylev\\_alehin\\_yagmur.pdf](https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2010-1/04_gorokhov_vasylev_alehin_yagmur.pdf) (accessed: 21.09.2025) (in Russian).
- Gubanov V.V., Golikov A.V. 2011. Specifics of designing chimneys with rigid braces. *Metallicheskie konstruksii (Metal constructions)*. Vol. 17. № 2. С. 115–122. URL: [https://donnasa.ru/publish\\_house/journals/mk/2011-2/05\\_gubanov\\_golikov.pdf](https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2011-2/05_gubanov_golikov.pdf) (accessed: 21.09.2025) (in Russian).

- Dinnik A.N. 1955. Selected works. Vol. 2. Application of Bessel functions to problems of elasticity theory. Kiev: Publishing House of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. 220 p. (in Russian).
- Kamke E. 1976. Handbook of Ordinary Differential Equations. Moscow: Nauka Publ. 576 p. (in Russian).
- Melnikov N.P. 1969. Antenna structures. Moscow: Znanie Publ. (in Russian).
- Pavlovskiy V.F., Kondra M.P. 1979. Steel towers: design and installation. Kiev: Budivelnik Publ. (in Russian).
- Perelmuther A.V. 2021. Formation and development of key ideas for designing high-rise structures of antenna structures. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo (Industrial and Civil Engineering)*. № 1. P. 10–20. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.01.10-20 (in Russian).
- Polyanin A.D., Zaitsev V.F. 2001. Handbook of Ordinary Differential Equations. Moscow: Fizmatlit Publ. 576 p. (in Russian).
- Sokolov A.G. 1971. Metal structures of antenna devices. Moscow: Stroyizdat Publ. (in Russian).
- Cellular communication. History. Standards. Technologies. Available at: <http://celnet.ru/gal49.php> (accessed: 09.08.2025) (in Russian).
- Sukharev F.I., Ivanenko N.A., Semenov S.Yu. 2021. The reaction of a building with a kinematic seismic insulation system to wind exposure and its analysis by means of LIRA-CAD. *IVD*. № 1 (73). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/reaktsiya-zdaniya-s-kinemateskoy-sistemoy-seysmoizolyatsii-na-etrovoe-vozdeystvie-i-eyo-analiz-sredstvami-lira-sapr> (accessed: 23.01.2026) (in Russian).
- Tanasoglo A.V., Bakayev S.N., Volchkov A.N. et al. 2017. A new design solution of the antenna support for cramped urban conditions. *Vestnik Donbasskoj natsionalnoj akademii stroitelsva I arkhitektury (Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture)*. Vol. 125. № 3. P. 50–54. URL: [https://donna.ru/publish\\_house/journals/vestnik/2017/2017-3\(125\)/st\\_09\\_tanasoglo\\_bakaev\\_volchkov\\_bakaeva\\_perevaryuha.pdf](https://donna.ru/publish_house/journals/vestnik/2017/2017-3(125)/st_09_tanasoglo_bakaev_volchkov_bakaeva_perevaryuha.pdf) (accessed: 21.09.2025) (in Russian).
- Timoshenko S.P. 1959. Fluctuations in engineering. Moscow: Fizmatgiz Publ. 440 p. (in Russian).
- Ulitin G.M., Tsarenko S.N. 2015. Bending vibrations of a rod with variable stiffness and distributed mass. *Applied Mathematics and Mechanics*. № 6. P. 817–823 (in Russian).
- Ulitin G.M., Tsarenko S.N. 2017. Bending vibrations of an elastic rod with variable stiffness compressed by a longitudinal force. *Zhurnal teoreticheskoy I prikladnoj mekhaniki (Journal of Theoretical and Applied Mechanics)* № 2 (59). P. 19–26 (in Russian).
- Tsarenko S.N. 2018. Dynamics of bending vibrations of structures with axial heterogeneity of geometric characteristics. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij (Construction Mechanics and Calculation of Structures)*. № 3(278). P. 48–54 (in Russian).
- Shevchenko F.L. 1999. Dynamics of elastic rod systems. Donetsk: DonGTU Publ. 268 p. (in Russian).

#### 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; Researcher ID: P-9864-2015; Scopus ID: 56596593600; ORCID: 0000-0003-2483-6809.

**Tsarenko Sergey Nikolaevich** – Kamchatka State Technical University; 683003, Russian Federation, Petropavlovsk-Kamchatsky; Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Professor of Technological Machines and Equipment Chair; tzarenko@rambler.ru. SPIN-code: 4554-4579, Author ID 758077; Researcher ID: P-9864-2015; Scopus ID: 56596593600; ORCID: 0000-0003-2483-6809.

**Танасогло Антон Владимирович** – Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; 129337, Россия, Москва; кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Металлические и деревянные конструкции»; a.v.tan@mail.ru. SPIN-код: 8936-6470, Author ID 1213498; Researcher ID: JFA-6248-2023; Scopus ID: 56826221800; ORCID: 0000-0002-1825-2738.

**Tanasoglo Anton Vladimirovich** – Moscow State University of Civil Engineering (National Research University); 129337, Russia, Moscow; Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of Metal and Timber Structures Chair; a.v.tan@mail.ru. SPIN-code: 8936-6470, Author ID 1213498; Researcher ID: JFA-6248-2023; Scopus ID: 56826221800; ORCID: 0000-0002-1825-2738.

**Голиков Александр Владимирович** – Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; 129337, Россия, Москва; кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлические и деревянные конструкции»; alexander\_golikov@mail.ru. SPIN-код: 1369-7819, Author ID 847929.

**Golikov Alexander Vladimirovich** – Moscow State University of Civil Engineering (National Research University); 129337, Russia, Moscow; Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Metal and Timber Structures Chair; alexander\_golikov@mail.ru. SPIN-code: 1369-7819, Author ID 847929.

Статья поступила в редакцию 26.02.2026; одобрена после рецензирования 15.04.2026; статья принята к публикации 23.04.2026.

The article was submitted 26.02.2026; approved after reviewing 15.04.2026; accepted for publication 23.04.2026.

Для цитирования: Царенко С.Н., Танасогло А.В., Голиков А.В. 2026. Разработка упрощенной математической модели для исследования динамики изгибных колебаний ступенчатых стоек. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. Вып. 76. С. 25–40. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2026-76-25-40>.

For citation: Tsarenko S.N., Tanasoglo A.V., Golikov A.V. 2026. Development of a simplified mathematical model for studying the dynamics of bending vibrations of step racks. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta (Bulletin of Kamchatka State Technical University)*. Iss. 76. P. 25–40 (in Russian). <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2026-76-25-40>.

Научная статья

УДК 664.8/9.022

DOI: 10.17217/2079-0333-2026-76-41-57

## ПРИМЕНЕНИЕ БАРЬЕРНЫХ ПЛЕНОК ГИДРОКОЛЛОИДОВ В ТЕХНОЛОГИЯХ МОРОЖЕНОЙ ПРОДУКЦИИ ИЗ ГИДРОБИОНТОВ

Чмыхалова В.Б.

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

Полноценный состав пищи невозможен без использования в рационе питания морепродуктов, качество которых зависит от способов их обработки и хранения. Важным фактором является пролонгирование сроков годности продукта с помощью приемов, исключающих использование химических консервантов, влияющих на безопасность продукции. Поэтому применение барьерных пленкообразующих покрытий на основе агара, которые замедляют окислительные и гидролитические процессы в готовом продукте за счет изоляции поверхности от контакта с окружающей средой, позволит продлить срок годности продукта без ухудшения его сенсорных, физико-химических и бактериологических характеристик.

**Ключевые слова:** агар, барьерные покрытия, сроки годности, филе.

Original article

## APPLICATION OF HYDROCOLLOID BARRIER FILMS IN THE TECHNOLOGIES OF FROZEN PRODUCTS FROM HYDROBIONTS

Chmykhalova V.B.

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

A complete diet is impossible without seafood, the quality of which depends on how it is processed and stored. An important factor is extending the shelf life of product by eliminating the use of chemical preservatives, which can affect product safety. Therefore, the use of barrier film-forming coatings based on agar, which slows down oxidative and hydrolytic processes in the final product by isolating the surface from contact with environment, would extend the product's shelf life without degrading its sensory, physicochemical, and bacteriological properties.

**Key words:** agar, barrier coatings, expiration dates, fillets.

### ВВЕДЕНИЕ

Морепродукты являются одним из наиболее популярных продуктов питания, доля потребления которого неуклонно растет [Лищенко, 2006; Елина, Благоданова, 2025].

Использование рыбы и морепродуктов в различных странах имеет свои особенности, связанные с территориальным размещением, национальными особенностями кухни, менталитетом потребителя. Некоторые страны, такие как Япония, Норвегия,

Исландия, на законодательном уровне разрабатывают меры, позволяющие наращивать потребление морепродуктов в целях обеспечения здоровья населения.

Производство морепродуктов имеет свои особенности, связанные с высокой скоростью порчи сырья, по этой же причине в процессе доставки продукции потребителю возникают определенные нюансы, требующие особых условий ее хранения. Особенно актуально использование технологий переработки и хранения, предполагающих защиту продукции от порчи для той ее части, которая реализуется потребителю, находящемуся вдали от районов промысла.

Стабильность и неизменность химических, физических и органолептических параметров пищевых продуктов определяет их хранимоспособность. Повышая ее, необходимо ориентироваться на одновременное повышение пищевой ценности продукта, улучшение сенсорных характеристик, физико-химических и микробиологических показателей, а также стабильность микробиологических показателей. Для решения этих проблем выбирается способ, режимы хранения и защитные мероприятия, обеспечивающие стабильность перечисленных параметров на высоком уровне в течение максимально длительного периода.

Общепризнано, что обработка продуктов холодом является наилучшим способом консервирования [Касьянов и др., 2001]. Объем производимой мороженой продукции доминирует перед продукцией других способов обработки и составляет около 70% от общего объема, при этом ее производство и потребление растут [Касьянов и др., 2001; Стрингер, Денис, 2004]. Популярность мороженой продукции объясняется следующими факторами [Tuuzlner, Koch, 2011]:

- естественные свойства сырья сохраняются на максимально возможном уровне длительное время;

- используя холодильные технологии, возможна добыча сырья в районах, отдаленных от мест переработки и хранения, есть возможность организовать перегрузку и транспортировку без значительных потерь;

- пролонгирование периода производства многих видов рыбной продукции вне зависимости от сроков и районов промысла;

- возможность практически круглогодичного обеспечения потребителя постоянным ассортиментом продукции, регулируя избытки или дефицит сырья;

- замораживанию подлежат любое сырье и рыбные продукты, для этого нет необходимости проводить специальную подготовку сырья;

- технология осуществима на береговых предприятиях и в условиях моря;

- консервирующее действие замораживания начинается сразу с момента его применения.

Важным фактором правильно организованного производственного процесса является его минимальное воздействие на экологию.

На конкурентоспособность рыбной продукции, произведенной в Камчатском крае, согласно Стратегии социально-экономического развития Камчатского края до 2030 г. [Стратегия...], оказывает влияние степень модернизации производства, использование эффективных современных технологий глубокой переработки. Примером продукции, в ходе производства которой достигается глубокая переработка сырья, является рыбное филе. В ходе производственного процесса, после удаления несъедобных частей, остается цельномышечная ткань, которая в ряде случаев является диетическим материалом, удобным для потребителя, поэтому пользующаяся спросом [Борец, 1991; Датский, Батанов, 2000].

Актуальным в настоящий момент является вопрос об увеличении продолжи-

тельности хранения мороженой рыбной продукции. Негативными последствиями длительного хранения мороженой рыбной продукции является денатурация части водо- и солерастворимой фракции белков, после чего эта фракция переходит в щелочерастворимое состояние, что впоследствии отрицательно влияет на пищевую и биологическую ценность продукта. Главным показателем, способствующим порче продукции при хранении, является переход белкового азота в небелковый, в ходе чего увеличивается значение показателя содержания азота летучих оснований [Артюхова и др., 2001]. Другими отрицательными последствиями, проявляющимися при хранении мороженой продукции, являются гидролиз и окисление жира, высыхание поверхностных слоев продукта и как следствие – потеря массы. Это определяет ограничение сроков реализации мороженой рыбной продукции.

В ряде технологий для стабилизации продукта при хранении используются химические препараты – антибиотики и антисептики. Это увеличивает химическую нагрузку на организм потребителя и в ряде случаев делает невозможным использование продукта для некоторых категорий потребителей (в детском питании, геронтопитании). Поэтому наряду с перечисленными способами актуально применять различные способы покрытия поверхности мороженой продукции, особенно экологически благоприятные [Долганова и др., 2011]. Таким образом, важной задачей является поиск способов ингибирования гидролитических и окислительных процессов, протекающих в замороженном продукте при хранении. Барьерные покрытия, в том числе пленкообразующие, демонстрируют свою эффективность, поэтому поиск новых вариантов, обеспечивающих максимальный эффект, весьма актуален.

Целью нашей работы является разработка и научное обоснование технологии мороженой рыбной продукции с пролонгированным сроком годности за счет применения барьерных покрытий поверхности.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отбор проб для проведения исследований был произведен в соответствии с требованиями ГОСТ 31339 «Рыба, нерыбные объекты и продукция из них. Правила приемки и методы отбора проб» и ГОСТ 7631 «Рыба, нерыбные объекты и продукция из них. Методы определения органолептических и физических показателей» [ГОСТ 7631-2008, 2008; ГОСТ 31339-2006, 2006].

С помощью социологического метода определяли предпочтение потребителей к использованию добавок при производстве пищевой продукции [Головин, 1992; Николаенко и др., 2011].

Сенсорные показатели продукта устанавливали методом парных сравнений, описательным методом и методом балльных шкал [Вытовтов, 2010; Головин, 1992; Николаенко и др., 2011; Сафронова, 1985; Ким и др., 2008].

Химические показатели исходного сырья и целевого продукта основаны на изучении накопления химических веществ, характеризующих изменения белков и жиров. Их определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 7636 «Рыба, морские млекопитающие, морские беспозвоночные и продукты их переработки. Методы анализа» [ГОСТ 7636-85, 1985].

Показательными являются следующие характеристики: содержание азота летучих оснований, перекисное, кислотное числа жира, рН, влагоудерживающая способность мышечной ткани рыбы. Их значения демонстрируют изменчивость качества сырья и продукта в процессе хранения.

Из микробиологических показателей демонстративны значения величины общей обсемененности микроорганизмами, а также обсемененности их отдельными видами.

Массовая доля воды определялась путем испарения влаги из образца в ходе тепловой обработки, и по разнице между весовыми показателями до и после обработки определяют количество влаги в продукте.

Определение количества минеральных компонентов предполагает удаление органической части из навески анализируемого продукта путем сжигания, после которого количество остатка (золы) определяется взвешиванием.

Для определения липидов был применен метод экстрагирования, который предполагает извлечение жира из навески продукта органическим растворителем, после удаления летучего растворителя количество жира фиксировалось взвешиванием.

Массовую долю белка определяли после кислотной минерализации образца. Катализаторами данного процесса были сульфат калия и сульфат меди. В ходе реакции образующийся аммиак отгоняли паром, улавливали раствором серной кислоты и количественно фиксировали титриметрическим методом.

Методика определения фракционного состава белков предполагает обработку белковой части сульфатом меди в присутствии щелочи, в ходе которой раствор приобретает сине-фиолетовую окраску. Количественное определение предполагает измерение оптической плотности раствора и сравнение полученного значения с калибровочным графиком [Антипова и др., 2004].

Содержание азота летучих оснований характеризует степень распада белка. Определение проводили по [ГОСТ 7636-85, 1985].

Для определения изменений, происходящих с жиром продукта, степени его гид-

ролиза и окисления фиксировали значения кислотного и перекисного чисел жира трески по [ГОСТ 7636-85, 1985].

Руководящими документами, которые используются при определении микробиологических показателей продукта, являются: Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» [ТР ТС 021/2011, 2011] и Технический регламент Евразийского экономического союза «О безопасности рыбы и рыбной продукции» [ТР ЕАЭС 040/2016, 2016]. Определением показателем было КМАФАнМ. Отбор проб, их подготовку и определение проводили по утвержденным методикам [ГОСТ 26668-85, 1985; ГОСТ 26669-85, 1986; ГОСТ 10444.15-94, 1995].

Достоверность полученных численных характеристик устанавливали методами графоаналитики и статистики. Данные обобщали и анализировали с помощью программы операционной системы Astra Linux. Анализ предполагает усреднение полученных показателей и установление величины средней погрешности. В итоге был определен доверительный интервал, который составил  $\Delta \pm 10\%$ , и надежности  $P$ , величина которой составила 0,95.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Используя современные технологии холодильной обработки, защищая рыбную мороженую продукцию от повреждающего действия факторов окружающей среды при хранении, производители заинтересованы в процессе покрытия поверхности продукции биоразлагаемым материалом.

Биоразлагаемые полимеры образуются в результате жизнедеятельности растений, животных или в процессе биосинтеза в клетках живых организмов и могут разрушаться в естественных условиях под воздействием света, температуры, влаги,

а также при участии микроорганизмов. Они более экологичны по сравнению с традиционными полимерными пленками, кроме того биосовместимы с компонентами продукта и способны к биоразложению [Касьянов и др., 2010]. Выбирая вид покрытия, ориентируются на их безопасность, учитывая особенности обработки и хранения продукции, соответствие требованиям нормативной документации [Касьянов и др., 2010]. Состав таких покрытий разнообразен. Основными их компонентами являются полисахариды, белки, липиды и различные добавки [Касьянов и др., 2010].

Покрытия на основе полисахаридов – это полимерные оболочки природного происхождения, такие как производные целлюлозы, пектин, камеди, крахмал, альгинаты, хитин, хитозан и др. Они эффективны в создании барьера, изолируя липиды продукта и влагу от повреждающего действия кислорода воздуха. Они также защищают продукт от возможного сорбирования посторонних запахов, достаточно механически прочны. Недостатком является высокая гидрофильность таких покрытий, что делает их применение затруднительным в присутствии водяного пара, так как в этом случае их барьерные свойства низкие. Они могут применяться для пролонгирования сроков годности различных пищевых продуктов, в том числе мороженой рыбной продукции [Касьянов и др., 2010]. В результате их использования исключается потемнение продукта при хранении, уменьшается степень усушки и интенсивность окисления жира.

Пленки на белковой основе содержат в составе сывороточные белки, соевый белок, желатин, казеин. Их механические свойства достаточны, а барьерные высоки. Их пленкообразующая и покровная способность на поверхности мороженого продукта зависит от термической стабильно-

сти, заряда, конформационных особенностей, молекулярной массы.

Покрытия на липидной основе высокоэффективны против обезвоживания и, как следствие, усушки продукта. Они улучшают сенсорное восприятие продукта, придавая ему блеск. Недостатком их является значительная гидрофобность, из-за которой они имеют значительную толщину и являются механически непрочным материалом, демонстрируя хрупкость [Касьянов и др., 2010].

Перспективным является использование покрытий на основе гидроколлоидов, полученных из растительных источников возобновляемого характера, а также из продуктов их переработки.

Выбирая вид покрытия и его основу, мы ориентировались на такие особенности, как эффективность применения, возможность создания однородного слоя на поверхности продукта, способность покрытия изменять его сенсорные характеристики, ценовой диапазон.

Рассмотрев перечисленные факторы, мы пришли к решению использовать в технологии производства филе рыбного мороженого гидроколлоидное барьерное покрытие на основе агара. Набухший материал помещали на водяную баню на 15 мин при постоянном перемешивании до полного растворения частиц агара. После тепловой обработки раствор охлаждали до температуры 45°C.

Для обработки поверхности мороженого блока трески выполняли следующее:

- погружали блоки в подготовленный раствор агара два раза, интервал между погружениями составлял 30–60 с. За это время пленка агара успевала закрепиться на поверхности и подсохнуть (образец № 1);

- однократно погружали блок в раствор агара на 10–15 с, далее помещали на поверхность, покрытую адгезионным ма-

териалом (пергаментом) и выдерживали для закрепления и подсыхания пленки агара. Процесс занимал 60 с (образец № 2).

Параллельно готовили контрольный образец, обработку его раствором агара не производили. Все подготовленные образцы были помещены в морозильную камеру при температуре воздуха минус 18°C, их хранили 6 мес при указанной температуре. Выбор наиболее приемлемого варианта производили, проводя исследования всех образцов в процессе хранения и сопоставляя полученные данные.

Подготовка проб к определению химических и физико-химических показателей заключалась в следующем. Образцы размораживали до достижения температуры в толще минус 1°C, после чего измельчали с помощью блендера. Аликвоты отбирали методом квартования.

Сравнительные результаты химических исследований отражены в таблице 1. Из ее данных видно, что во всех образцах филе, хранившегося в течение 6 мес, наблюдается снижение содержания воды в среднем на 1,13% относительно первоначальных показателей. Такая потеря влаги является минимальной и не отражается на пищевой и биологической ценности и консистенции продукта.

Наблюдается увеличение перехода белкового азота в небелковый на 1,6% у образца, не обработанного раствором агара (контроль), при хранении в течение 5 мес, на 0,2% у образца № 1 и на 0,6% у образца № 2. Следовательно, образцы филе, обработанные раствором агара, более безопасны при дальнейшем употреблении в пищу относительно филе, не прошедшего такую обработку.

Таблица 1. Сравнительные химические показатели мороженого филе трески

Table 1. Comparative chemical characteristics of frozen cod fillet

Показатель	Срок хранения						
	Контрольный образец (без обработки агаром)			Образец № 1 (обработка агаром)		Образец № 2 (обработка агаром)	
	10 сут	5 мес	6 мес	5 мес	6 мес	5 мес	6 мес
Массовая доля воды, %	80,1	79,1	78,9	79,6	79,3	79,2	78,9
Массовая доля золы, %	0,98	-	-	-	-	-	-
Массовая доля липидов, %	0,16	-	-	-	-	-	-
Массовая доля азота летучих оснований, %	31	38	44	32	35	34	37
Массовая доля белковых веществ, %	16,3	17,3	17,5	16,8	17,1	17,2	17,5
Массовая доля водорастворимых белковых фракций, %	21	12	11	19,2	19	19,4	16
Массовая доля солерастворимых белковых фракций, %	57	42	42	57,8	58	52,1	53
Массовая доля щелочерастворимых белковых фракций, %	22	46	47	23	23	28,5	31
Кислотное число жира, мг КОН	0,09	0,18	0,21	0,10	0,11	0,12	0,14
Перекисное число жира, ммоль ½ O/кг	0,008	0,49	0,57	0,10	0,11	0,13	0,16

Содержание белковых веществ в образцах, хранившихся 6 мес, увеличилось на фоне снижения содержания воды в продукте.

В мышечной ткани мороженого филе, хранившегося менее месяца, водорастворимые (саркоплазматические) белки составляли 21%, солерастворимые (миофибриллярные) – 53%, щелочерастворимые (соленерастворимые, состоящие из белков, находящихся в особом состоянии и денатурированных, перешедших в нерастворимое состояние из первых двух фракций) – 26%. При замораживании и последующем холодильном хранении это соотношение изменилось: снизилось содержание растворимых миофибриллярных и саркоплазматических белков и увеличилось количество денатурированных. Как известно, миофибриллярные белки отвечают за сохранение структуры мышечной ткани. При переходе их в денатурированное состояние нарушается связь белка с водой, целостность мышечных волокон, что при последующем размораживании сырья приводит к значительным потерям тканевого сока, получению продукции с сухой и жесткой консистенцией. В мороженом филе, хранившемся при стандартных температурных условиях, содержание щелочерастворимой фракции (денатурированных белков) не должно превышать 40% [Артюхова и др., 2001], что и наблюдалось в образцах, обработанных раствором агара. В контрольном образце щелочерастворимые белки после 6 мес хранения составили 47%, что приводит к снижению пищевой и биологической ценности филе и получению в дальнейшем готовых продуктов с жесткой консистенцией. Также отмечено увеличение значений кислотного и перекисного чисел тканевого жира.

Следующим этапом работы было определение стабильности органолептических характеристик продукта. В тех случа-

ях, когда в процессе хранения продукт демонстрирует устойчивость микробиологических характеристик, основным критерием, ограничивающим срок его годности, становится изменение органолептических характеристик продукта при хранении. В этом случае мы устанавливаем «выраженное сохранение требуемых органолептических свойств», как определяет британский институт пищевых исследований [Килкаст, Субраманиами, 2012].

С этой целью наряду с установлением химических показателей продукта и их изменения при хранении мы определяли такие органолептические показатели, как внешний вид филе, его запах и цвет после дефростации и консистенцию после пробной варки.

Органолептические показатели были определены стандартными методами [ГОСТ 7631-2008, 2008], параллельно был применен метод, не являющийся стандартным, который основан на использовании балльных шкал. Результаты органолептических исследований продукта обобщены в таблице 2. Примененная балльная шкала, используемая для оценки полученных характеристик, приведена в таблице 3. Данные показывают, что в образце (контрольном), обработка поверхности которого раствором агара не производилась, по истечении 5 мес хранения был отчетливо ощутим запах и привкус окисленного жира, консистенция образца после проведенной пробной тепловой обработки была сухой, крошащейся, слоистой и волокнистой.

Результаты сенсорной оценки филе трески мороженого представлены на профилограммах цвета, запаха и консистенции (см. рис. 1–3). Приведенные данные демонстрируют следующие особенности: через 8 мес хранения цвет и запах образцов, обработанных раствором агара, был стабилен и не зависел от кратности обработок. У образца, не обработанного раствором

агара (контрольного), через 6 мес возникли запах окисленного жира (на данном этапе слабый) и незначительное пожелтение поверхности. Более значимо изменилась консистенция образцов через 8 мес хранения. Для оценки этого параметра была проведена пробная варка образцов в течение 5 мин при температуре кипения. После варки у образца, не обработанного раствором агара (контрольного), снизился показатель, демонстрирующий свойственность параметра применяемому сырью, образец стал расслаиваться по септам, стал крошливым при небольшой механической нагрузке, была утрачена сочность мяса, стала

доминировать сухость. Наилучшая сохранность показателей консистенции была у образца филе, дважды обработанного раствором агара, то есть имеющего большую толщину покрытия поверхности гидроколлоидом (образец № 1). У образца, однократно обработанного раствором агара (образец № 2), была заметна сухость консистенции. Таким образом, толщина покрытия поверхности раствором гидроколлоида, сформированная путем двукратного погружения материала в раствор агара, обеспечивает большую защиту образца от внешних воздействий, влияющих на консистенцию материала.

Таблица 2. Сравнительные показатели сенсорной оценки филе трески мороженого

Table 2. Comparative indicators of sensory evaluation of frozen cod fillet

Показатель	Срок хранения			
	Контрольный образец (без обработки агаром)		Образец № 1 (обработка агаром)	Образец № 2 (обработка агаром)
	10 сут	5 и 6 мес	5 и 6 мес	5 и 6 мес
Внешний вид	Брикеты чистые, плотные с ровной поверхностью			
Средний балл (внешний вид, кроме цвета)	5	5	5	5
Цвет после размораживания	Белый, свойственный данному виду рыбы			
Средний балл (цвет)	5	5	5	5
Запах после размораживания	Свежий	Слабый запах окисленного жира	Свежий	Свежий
Средний балл (запах)	5	4	5	5
Консистенция после отваривания	Сочная, нежная	Суховатая, волокнистая	Сочная, нежная, ломкая	Сочная, нежная, ломкая
Средний балл (плотность)	5	5	5	5
Средний балл (сочность)	4	4	4	4

Таблица 3. Оценочная балльная шкала для установления сенсорных характеристик филе трески мороженого

Table 3. Evaluation scale for determining the sensory characteristics of frozen cod fillet

Обобщенный показатель	Единичный показатель	Характеристика баллов	Балл
Внешний вид	Целостность формы брикета	Сохранная, поверхность ровная, чистая	5
		Сохранная, с незначительными деформациями	4
		Сохранная, мясо по кромке брикета имеет небольшие разрыхления	3
		Нарушенная, значительное разрыхление мяса по кромке брикета	2
		Значительно нарушенная, заметные отклонения от правильной геометрической формы	1
	Нарушенность брикета	Без нарушений	5
		С незначительными нарушениями	3
		Со значительными нарушениями	1

Окончание табл. 3

The End of the Table 3

Обобщенный показатель	Единичный показатель	Характеристика баллов	Балл
Внешний вид	Правильность разделки	Правильная	5
		С единичными отклонениями	4
		С несущественными отклонениями	3
		С заметными отклонениями	2
		Со значительными отклонениями	1
	Характерность цвета мяса	Характерный для данного вида филе	5
		Отдельные фрагментарные пожелтения участков незначительной площади	4
		Отдельные участки пожелтения, имеющие значительный охват	3
		От светло-серого до светло-желтого	2
		Темно-серый, интенсивно желтый	1
Запах	Характерность запаха	Характерный для свежего продукта	5
		С присутствием оттенков постороннего запаха	4
		Слабо выраженный посторонний	3
		Интенсивный посторонний	2
		Доминирующий посторонний	1
Консистенция	Степень плотности	Плотная, характерная для данного вида рыбы	5
		Плотная, заметно фрагментарное расслоение по септам	4
		Плотная, имеется незначительное расслоение продольного характера по септам	3
		Отчетливо расслаивающаяся по септам	2
		Крошащаяся	1
	Степень сочности	Очень сочная	5
		Достаточно сочная	4
		Незначительно суховатая	3
		Выраженно сухая	2

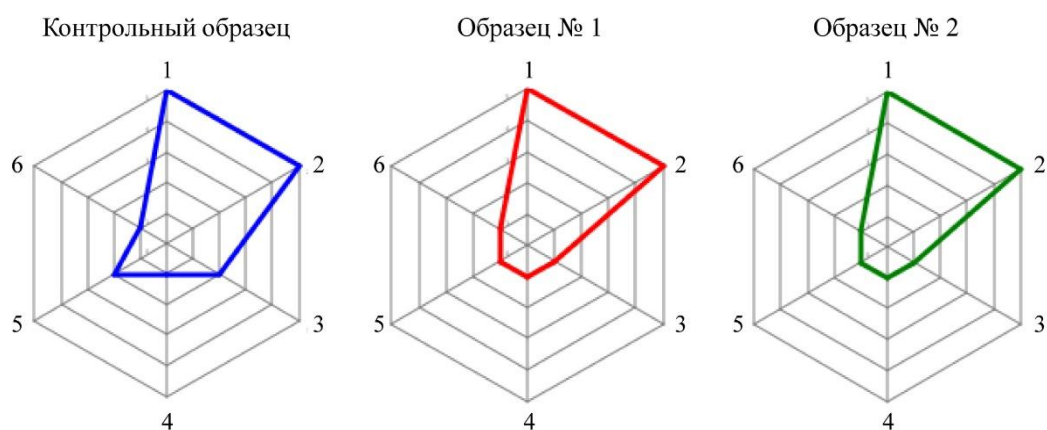


Рис. 1. Профилограмма изменения цвета образцов через 8 мес хранения: контрольный образец, двукратно обработанный раствором агара (образец № 1), однократно обработанный раствором агара (образец № 2). Параметры оценивали по следующим характеристикам: 1 – общее впечатление; 2 – свойственный данному виду филе; 3 – отдельные незначительные участки пожелтения; 4 – отдельные более значительные участки пожелтения; 5 – светло-желтый; 6 – желтый

Fig. 1. Profilogram of color changes in the investigated samples after 8 months of storage: control sample; sample treated with agar solution twice (sample № 1); sample treated with agar solution once (sample № 2). Parameters were evaluated based on the following characteristics: 1 – general impression; 2 – typical for this type of fillet; 3 – minor areas of yellowing; 4 – more significant areas of yellowing; 5 – light yellow color of fillet; 6 – yellow color of fillet

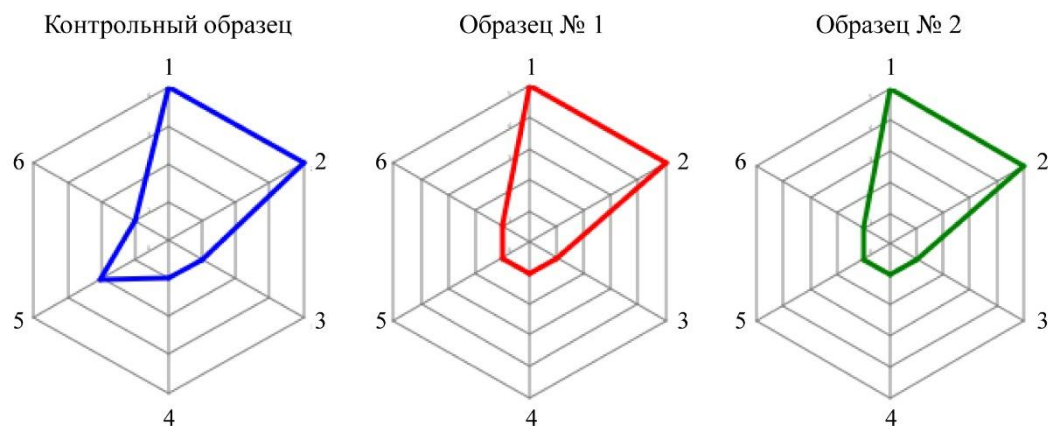


Рис. 2. Профилограмма изменения запаха образцов через 8 мес хранения: контрольный образец; двукратно обработанный раствором агара (образец № 1); однократно обработанный раствором агара (образец № 2). Ароматические характеристики оценивали следующим образом: 1 – общее впечатление; 2 – свойственный свежему продукту; 3 – посторонний; 4 – прогорклый; 5 – окисленный; 6 – с признаками микробиологической порчи (гниение)

Fig. 2. Profilogram of odor changes in samples after 8 months of storage: control sample; sample treated with agar solution twice (sample № 1); sample treated with agar solution once (sample № 2). Parameters were evaluated based on the following characteristics: 1 – general impression; 2 – characteristic of a fresh product; 3 – foreign; 4 – rancid; 5 – oxidized; 6 – with signs of microbiological spoilage (rot)

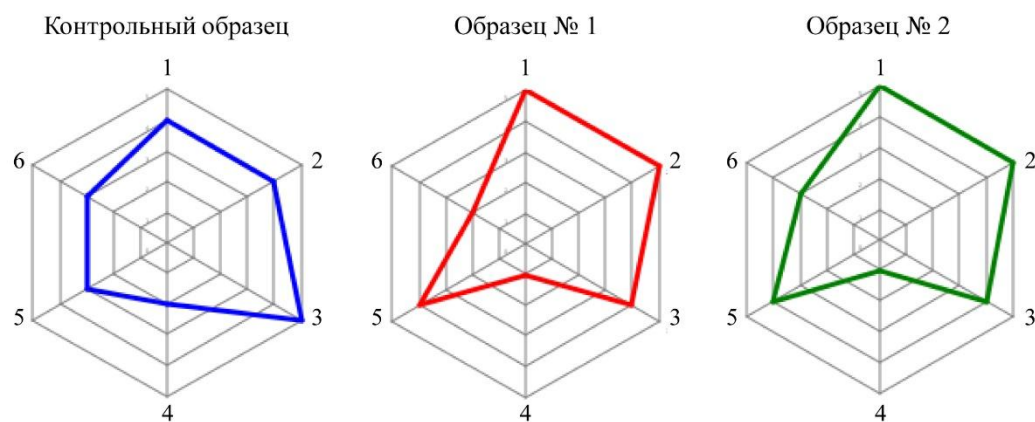


Рис. 3. Профилограмма изменения консистенции образцов через 8 мес хранения: контрольный образец; двукратно обработанный раствором агара (образец № 1); однократно обработанный раствором агара (образец № 2). Реологические параметры продукта оценивали по следующей шкале: 1 – свойство не ощущается; 2 – свойство ощущается фрагментарно; 3 – свойство ощущается слабо; 4 – свойство умеренно выражено; 5 – свойство сильно выражено. Консистенцию продукта оценивали, используя следующие характеристики: 1 – общее впечатление; 2 – свойственная объекту; 3 – слоющаяся по септам; 4 – крошащаяся; 5 – плотная, сочная; 6 – сухая

Fig. 3. Profilogram of changes in sample consistency after 8 months of storage: control sample; sample treated with agar solution twice (sample № 1); sample treated with agar solution once (sample № 2). The rheological parameters of the product were assessed using the following scale: 1 – parameter not expressed; 2 – parameter expressed fragmentarily; 3 – parameter expressed weakly; 4 – parameter moderately expressed; 5 – parameter strongly expressed. The consistency of the product was assessed using the following characteristics: 1 – general impression; 2 – characteristic of the object; 3 – stratified by septa; 4 – crumbly; 5 – dense, juicy; 6 – dry

Одним из методов, позволяющих констатировать порчу пищевого продукта, является микробиологический [Килкаст, Субраманиами, 2012]. Существует определенная взаимосвязь между биохимическими процессами, протекающими при хранении продукта, и ростом микрофлоры.

На поверхности поступающей на обработку рыбы аккумулируются многочисленные виды бактерий из разных родов [Перетрухина, Перетрухина, 2005]. Порчу гидробионтов вызывают альтеромонады (*Alteromonas nigrifaciens*), псевдомонады (*Pseudomonas fragi*, *P. fluorescens*, *P. perolens*, *P. putida*), *Brochothrix thermosphacta* и *B. campestris*, *Shwanella putrefaciens*, фотобактерии (*Photobacterium phosphorous*), аэромонады (*Aeromonas hydrophila*, *A. salmonicida*). При хранении типична также порча рыбы и морепродуктов, вызванная молочнокислыми бактериями, размножение которых наиболее очевидно в вакуумной и МГС-упаковке [Килкаст, Субраманиами, 2012].

Консервирование замораживанием обеспечивает гибель до 99% клеток микроорганизмов. Микрофлора мороженой продукции представлена грамтрицательными бактериями рода *Pseudomonas* и неспоровыми грамположительными бактериями родов *Mycobacterium*, *Mucococcus*, *Micrococcus*. Достаточной сохранностью по завершении холодильной обработки

обладают бактерии группы кишечных палочек, сальмонеллы и коагулазоположительные стафилококки [Дутова и др., 1976; Долганова и др., 2005].

Индикатором начала процессов порчи продукта в наших исследованиях было значение КМАФАнМ, которое, в соответствии с требованиями Технического регламента Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» [ТР ТС 021/2011, 2011] и Технического регламента Евразийского экономического союза «О безопасности рыбы и рыбной продукции» [ТР ЕАЭС 040/2016, 2016], не должно превышать  $1 \times 10^5$  КОЕ/г.

Результаты наших исследований показывают стабильность значений КМАФАнМ для всех рассматриваемых образцов на протяжении контрольного периода хранения при температуре минус 18°C (табл. 4). Как видно из таблицы 4, показатели были в пределах допустимых значений, и есть значительный запас в их величине по сравнению с предельными значениями. Заметно значительное снижение значений КМАФАнМ у образцов продукта, обработанных раствором агаром. Это доказывает, что пленка гидроколлоида имеет защитное действие и изолирует продукт от контакта с внешней средой. При этом наиболее эффективна двукратная обработка, создающая покрытие поверхности продукта большей толщины.

Таблица 4. Изменение значений КМАФАнМ филе трески мороженого при хранении, КОЕ/г

Table 4. Changes in total aerobic microbial corent (ТАМС) values of frozen cod fillet during storage, CFU/g

Наименование продукции	Длительность хранения	КМАФАнМ, КОЕ/г
Рыба-сырец	–	$3,7 \times 10^4$
Контрольный образец (без обработки агаром)	10 сут	$7,2 \times 10^2$
	5 мес	$7,7 \times 10^2$
	6 мес	$7,7 \times 10^2$
Образец № 1 (обработка агаром)	5 мес	$2,5 \times 10^2$
	6 мес	$2,5 \times 10^2$
Образец № 2 (обработка агаром)	5 мес	$2,8 \times 10^2$
	6 мес	$2,8 \times 10^2$

Порча рыбы обусловлена активностью микроорганизмов и нативных ферментов. После стадии ооченения в мышечной ткани рыб происходят многочисленные биохимические реакции (протеолиз, липолиз, гликолиз и окисление). В связи с этим основные методы оценки срока годности рыбы включают анализ содержания биогенных аминов, общего количества летучих соединений, триметиламина, нуклеотидов и нуклеозидов, оценку изменений цвета и текстуры, органолептический анализ, микробиологический анализ.

Для определения сроков годности филе трески мороженого при температуре минус 18°C для опытного (филе, покрытое пленкой гидроколлоида) и для контрольного образцов (без покрытия) исследовались изменения микробиологических и химических показателей, результаты которых приведены в таблице 5.

Данные, приведенные в требованиях Технического регламента Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» [ТР ТС 021/2011, 2011] и Технического регламента Евразийского экономического союза «О безопасности рыбы и рыбной продукции» [ТР ЕАЭС 040/2016, 2016] для филе рыбного мороженого показывают допустимость значений КМАФАнМ и отсутствие бактерий группы кишечных палочек (*Escherichia coli*) в течение всего периода хранения продукции, а также снижение показателя КМАФАнМ в образцах, прошедших обработку поверхности раствором гидроколлоида в три раза. По истечении 8 мес наблюдения не проводили, поэтому в настоящий момент установленный нами срок хранения разрабатываемой продукции составляет 8 мес с момента окончания производственного процесса.

Это позволяет сделать вывод о более низкой бактериальной обсемененности, которую демонстрируют обработанные

барьерным покрытием на основе гидроколлоида образцы и большей стабильности в хранении.

В результате проведенных исследований разработана технология производства филе трески мороженого с пролонгированным сроком годности за счет применения обработки замороженного филе барьерными пленками на основе полисахаридов (рис. 4).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ литературных источников показал, что в настоящее время большинство применяемых и запатентованных способов увеличения сроков годности мороженой продукции предусматривают применение консервантов, которые способны оказывать негативное действие на организм человека. В то же время агар, являющийся естественным природным компонентом, оказывает защитное действие на продукт при его хранении.

Нами разработана технология производства филе рыбного мороженого, обработанного барьерным покрытием на основе полисахарида (агара). При этом показано, что наиболее рациональным способом является двукратное погружение блока мороженой рыбы в раствор агара. При таком способе обработки после размораживания были отмечены более высокие органолептические показатели и меньшее значение кислотного числа жира как показателя гидролиза. В то же время образцы, обработанные раствором агара, характеризовались высокими показателями качества. Срок годности готовой продукции составил 8 мес при температуре хранения минус 18°C, что на 3 мес превышает срок, предусмотренный НД.

Проведенные в ходе работы исследования показали, что разработанная техно-

логия позволяет значительно увеличить продолжительность хранения филе, при этом максимально сохранить первоначальные свойства сырья. Также отметим, что

новый вид защитного покрытия не влияет на сенсорные характеристики блюд, изготавливаемых из обработанного агаром полуфабриката.

Таблица 5. Динамика изменения микробиологических показателей мороженой рыбной продукции в процессе хранения

Table 5. Dynamics of changes in microbiological indicators of frozen fish products during storage

Срок хранения, мес	КМАФАнМ, КОЕ/г		БГКП ( <i>Escherichia coli</i> ), КОЕ/0,01 г	
	Контрольный образец	Опытный образец	Контрольный образец	Опытный образец
3	$7,6 \times 10^2$	$2,5 \times 10^2$	Отсутствие	Отсутствие
5	$7,7 \times 10^2$	$2,5 \times 10^2$	Отсутствие	Отсутствие
6	$7,7 \times 10^2$	$2,5 \times 10^2$	Отсутствие	Отсутствие
8	$7,7 \times 10^2$	$2,5 \times 10^2$	Отсутствие	Отсутствие



Рис. 4. Технологическая схема производства филе трески мороженого с применением барьерных покрытий на основе агара

Fig. 4. Technological scheme for the production of frozen cod fillet using agar-based barrier coatings

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

- Антипова Л.В., Глотова И.А., Рогов И.А. 2004. Методы исследования мяса и мясных продуктов. Москва: Колос. 285 с.
- Артюхова С.А., Богданов В.Д., Дацун В.М. 2001. Технология продуктов из гидробионтов. Москва: Колос. 496 с.
- Борец Л.А. 1991. Основы рационального использования запасов донных рыб западно-камчатского шельфа. *Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Рациональное использование биоресурсов Тихого океана»*. Владивосток. С. 85–87.
- Вытовтов А.А. 2010. Теоретические и практические основы органолептического анализа продуктов питания. Санкт-Петербург: ГИОРД. 232 с.
- Головин А.Н. 1992. Контроль продукции из водного сырья. Москва: Колос. 255 с.
- ГОСТ 26668-85. 1986. Продукты пищевые и вкусовые. Методы отбора проб для микробиологических анализов. Москва: Издательство стандартов. 10 с.
- ГОСТ 26669-85. 1986. Продукты пищевые и вкусовые. Подготовка проб для микробиологических анализов. Москва: Издательство стандартов. 8 с.
- ГОСТ 10444.15-94. 1995. Продукты пищевые. Методы определения количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов. Москва: Издательство стандартов. 8 с.
- ГОСТ 7631-2008. 2008. Рыба, нерыбные объекты и продукция из них. Методы определения органолептических и физических показателей. Москва: Стандартинформ. 10 с.
- ГОСТ 7636-85. 1985. Рыба, морские млекопитающие, морские беспозвоночные и продукты их переработки. Методы анализа. Москва: Стандартинформ. 126 с.
- ГОСТ 31339-2006. 2006. Рыба, нерыбные объекты и продукция из них. Правила приемки и методы отбора проб. Москва: Стандартинформ. 11 с.
- Датский А.А., Батанов Р.Л. 2000. Тресковые прибрежных вод северо-западной части Берингова моря и их рациональное использование. *Тезисы докладов второй областной научно-практической конференции «Проблемы охраны и рационального использования биоресурсов Камчатки»*. Петропавловск-Камчатский. С. 46–47.
- Долганова Н.В., Мижучева С.А., Газиева С.О. и др. 2011. Упаковка, хранение и транспортировка рыбы и рыбных продуктов. Санкт-Петербург: ГИОРД. 272 с.
- Долганова Н.В., Першина Е.В., Хасанова З.К. 2005. Микробиология рыбы и рыбных продуктов. Москва: Мир. 224 с.
- Дутова Е.Н., Гофтарш М.М., Призренова И.И. и др. 1976. Техническая микробиология рыбных продуктов. Москва: Пищевая промышленность. 271 с.
- Елина В.М., Благодирова М.В. 2025. Высокобелковая лапша из минтая – новый камчатский продукт. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. Вып. 72. С. 8–23. URL: <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2025-72-8-23>.
- Касьянов Г.И., Боковикова Т.Н., Тарасов В.Е. 2010. Диоксид углерода: производство и применение. Краснодар: Экоинвест. 171 с.
- Касьянов Г.И., Иванова Е.Е., Одинцов А.Б. и др. 2001. Технология переработки рыбы и морепродуктов. Ростов-на-Дону: Март. 416 с.

- Килкаст Д., Субраманиами П. 2012. Стабильность и срок годности. Мясо и рыбопродукты. Санкт-Петербург: Профессия. 420 с.
- Ким Г.Н., Ким И.Н., Сафронова Т.М. и др. 2008. Сенсорный анализ продуктов из гидробионтов. Москва: Колос. 534 с.
- Лищенко В.Ф. 2006. Мировая продовольственная проблема: белковые ресурсы (1960–2005 гг.). Москва: ДеЛи принт. 272 с.
- Николаенко О.А., Шокина Ю.В., Волченко В.И. 2011. Методы исследования рыбы и рыбных продуктов. Учебное пособие. Санкт-Петербург: ГИОРД. 76 с.
- Перетрухина А.Т., Перетрухина И.В. 2005. Микробиология сырья и продуктов водного происхождения. Санкт-Петербург: ГИОРД. 320 с.
- Сафронова Т.М. 1985. Органолептическая оценка рыбной продукции. Справочник. Москва: Агропромиздат. 216 с.
- Стратегия социально-экономического развития Камчатского края до 2030 г. URL: <https://storage.strategy24.ru/files/strategy/201704/1418aebb23781b33170bcb5a8f22bee5.pdf> (дата обращения: 25.01.2026).
- Стрингер М., Денис К. 2004. Охлажденные и замороженные продукты. Санкт-Петербург: Профессия. 496 с.
- Технический регламент Евразийского экономического союза «О безопасности рыбы и рыбной продукции» (ТР ЕАЭС 040/2016). 2016. Решением Совета Евразийской экономической комиссии от 18 октября 2016 г. № 162. URL: <http://docs.cntd.ru/document/420394425> (дата обращения: 25.01.2026).
- Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» (ТР ТС 021/2011). 2011. Утвержден Решением Комиссии Таможенного союза от 09 декабря 2011 г. № 880. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902320560> (дата обращения: 25.01.2026).
- Tyuzlner M., Koch M. 2011. Fish processing technology. St. Petersburg: Professiya. 404 p.

## REFERENCES

- Antipova L.V., Glotova I.A., Rogov I.A. 2004. Methods of studying meat and meat products. Moscow: Kolos Publ. 285 p. (in Russian).
- Artyukhova S.A., Bogdanov V.D., Datsun V.M. 2001. Technology of products from hydrobionts. Moscow: Kolos Publ. 496 p. (in Russian).
- Borets L.A. 1991. Fundamentals of rational use of bottom fish stocks from western Kamchatka's shelf. *Abstracts of the All-Union Conference "Rational Use of Bioresources of the Pacific Ocean"*. Vladivostok. P. 85–87 (in Russian).
- Vyotovtov A.A. 2010. Theoretical and practical foundations of organoleptic analysis of food products. St. Petersburg: GIORД Publ. 232 p. (in Russian).
- Golovin A.N. 1992. Control of products from aqueous raw materials. Moscow: Kolos Publ. 255 p. (in Russian).
- GOST 26668-85. 1986. Food and flavor products. Methods of sampling for microbiological analysis. Moscow: Publishing House of Standards. 10 p. (in Russian).
- GOST 26669-85. 1986. Food and flavor products. Preparing samples for microbiological analysis. Moscow: Publishing House of Standards. 8 p. (in Russian).
- GOST 10444.15-94. 1995. Food products. Methods for determining the quantity of mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms. Moscow: Publishing House of Standards. 8 p. (in Russian).
- GOST 7631-2008. 2008. Fish, non-fish objects, and their products. Methods for

- determining organoleptic and physical indicators. Moscow: Standartinform. 10 p. (in Russian).
- GOST 7636-85. 1985. Fish, marine mammals, marine invertebrates, and their processed products. Methods of analysis. Moscow: Standartinform. 126 p. (in Russian).
- GOST 31339-2006. 2006. Fish, non-fish objects, and their products. Acceptance rules and sampling methods. Moscow: Standartinform. 11 p. (in Russian).
- Dansky A.A., Batanov R.L. 2000. Codfish of the coastal waters of the northwestern Bering Sea and their rational use. *Abstracts of the second regional scientific and practical conference "Problems of protection and rational use of bioresources of Kamchatka"*. Petropavlovsk-Kamchatsky. P. 46–47 (in Russian).
- Dolganova N.V., Mizhueva S.A., Gazieva S.O. et al. 2011. Packaging, storage and transportation of fish and fish products. St. Petersburg: GIORD Publ. 272 p. (in Russian).
- Dolganova N.V., Pershina E.V., Khasanova Z.K. 2005. Microbiology of fish and fish products. Moscow: Mir Publ. 224 p. (in Russian).
- Dutova E.N., Goftarsh M.M., Prizrenova I.I. et al. 1976. Technical microbiology of fish products. Moscow: Food industry Publ. 271 p. (in Russian).
- Elina V.M., Blagonravova M.V. 2025. High-protein pollock noodles – a new product from Kamchatka. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta (Bulletin of Kamchatka State Technical University)*. Iss. 72. P. 8–23. URL: <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2025-72-8-23> (in Russian).
- Kasyanov G.I., Bokovikova T.N., Tarasov V.E. 2010. Carbon dioxide: production and application. Krasnodar: Ecoinvest Publ. 171 p. (in Russian).
- Kasyanov G.I., Ivanova E.E., Odintsov A.D. et al. 2001. Technology of fish and seafood processing. Rostov-on-Don: Mart Publ. 416 p. (in Russian).
- Kilkast D., Subramaniamy P. 2012. Stability and shelf life. *Meat and Fish Products*. St. Petersburg: Profession Publ. 420 p. (in Russian).
- Kim G.N., Kim I.N., Safronova T.M. et al. 2008. Sensory analysis of products from hydrobionts. Moscow: Kolos Publ. 534 p. (in Russian).
- Lishchenko V.F. 2006. The World food problem: Protein resources (1960–2005). Moscow: DeLi Print Publ. 272 p. (in Russian).
- Nikolaenko O.A., Shokina Yu.V., Volchenko V.I. 2011. Methods of fish and fish product research. Study guide. St. Petersburg: GIORD Publ. 76 p. (in Russian).
- Peretruxhina A.T., Peretruxhina I.V. 2005. Microbiology of raw materials and products of aquatic origin. St. Petersburg: GIORD Publ. 320 p. (in Russian).
- Safronova T.M. 1985. Organoleptic evaluation of fish products. Handbook. Moscow: Agropromizdat Publ. 216 p. (in Russian).
- Socio-Economic Development Strategy of Kamchatka Krai until 2030 URL: <https://storage.strategy24.ru/files/strategy/201704/1418aebb23781b33170bcb5a8f22bee5.pdf> (accessed: 25.01.2026) (in Russian).
- Stringer M., Denis, K. 2004. Chilled and Frozen Products. St. Petersburg: Profession. 496 p. (in Russian).
- Technical regulations of the Eurasian Economic Union "On the safety of fish and fishery products" (EAEU TR 040/2016). 2016. By decision of the Council of the Eurasian Economic Commission, on October 18, 2016. № 162. URL: <http://docs.cntd.ru/document/420394425> (accessed: 25.01.2026) (in Russian).

- Technical regulations of the Customs Union “On food safety” (TR CU 021/2011). 2011. Approved by the Decision of the Customs Union Commission on December 9, 2011; № 880. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902320560> (accessed: 25.01.2026) (in Russian).
- Tyuzlner M., Koch M. 2011. Fish processing technology. St. Petersburg: Professiya. 404 p.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ  
INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

**Чмыхалова Виктория Борисовна** – Камчатский государственный технический университет; 683003, Россия, Петропавловск-Камчатский; кандидат биологических наук, заведующий кафедрой «Технологии пищевых производств»; [Chmykhalovav@mail.ru](mailto:Chmykhalovav@mail.ru). SPIN-код: 6298-2079, Author ID: 914814.

**Chmykhalova Victoria Borisovna** – Kamchatka State Technical University; 683003, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Candidate of Biological Sciences, Head of Food Production Technologies Chair; [Chmykhalovav@mail.ru](mailto:Chmykhalovav@mail.ru). SPIN-code: 6298-2079, Author ID: 914814.

Статья поступила в редакцию 27.03.2026; одобрена после рецензирования 08.06.2026; статья принята к публикации 15.06.2026.

The article was submitted 27.03.2026; approved after reviewing 08.06.2026; accepted for publication 15.06.2026.

Для цитирования: Чмыхалова В.Б. 2026. Применение барьерных пленок гидроколлоидов в технологиях мороженой продукции из гидробионтов. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. Вып. 76. С. 41–57. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2026-76-41-57>.

For citation: Chmykhalova V.B. 2026. Application of hydrocolloid barrier films in the technologies of frozen products from hydrobionts. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta (Bulletin of Kamchatka State Technical University)*. Iss. 76. P. 41–57 (in Russian). <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2026-76-41-57>.

Научная статья

УДК 582.272.46:661.47

DOI: 10.17217/2079-0333-2026-76-58-72

**СОДЕРЖАНИЕ ЙОДА У РАЗНОВОЗРАСТНЫХ ГЕНЕРАЦИЙ  
КАМЧАТСКОЙ ЛАМИНАРИЕВОЙ ВОДОРΟΣЛИ *HEDOPHYLLUM DENTIGERUM*  
И ЕГО ПОТЕРИ ПРИ ИХ ВЫСУШИВАНИИ**

Клочкова Н.Г.<sup>1</sup>, Сизенцов Н.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Камчатский филиал Тихоокеанского института географии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Партизанская, 6.

<sup>2</sup> Камчатский государственный университет им. В. Беринга, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, 4.

Йододефицит в камчатских почвах и выращенной на ней продукции вызывает необходимость использования для их обогащения йодсодержащих препаратов. Лучшими из них являются водорослевые удобрения и водные экстракты. Для их получения на Камчатке наиболее перспективны бурые ламинариевые водоросли. Изучение содержания йода у одного из наиболее массовых представителей этой группы, *Hedophyllum dentigerum*, в период его полной зрелости показало, что у его разновозрастных представителей оно разное и колеблется от 0,24% от абсолютно сухого вещества у сеголеток до 0,42% у образцов четвертого года жизни. Проведенные исследования, кроме того, показали, что в процессе сушки водоросли активно теряют молекулярный йод и что процент его потерь у разновозрастных растений разный. Наибольший он у самых старовозрастных представителей популяции этого вида. Высыхая до воздушно-сухого состояния при температуре 18–20°C, они теряют его до 19% от исходного количества, а при температуре 45°C до 30%. На основании этого сделан вывод о том, что *H. dentigerum* перспективен для получения йодсодержащей продукции и что лучшим способом сохранения у него молекулярного йода в результате сублимации является заморозка свежесобранных водорослей.

**Ключевые слова:** возрастное развитие ламинариевых, йод, йододефицит, йодонакопление, *Hedophyllum dentigerum*, Laminariales.

Original article

**IODINE CONTENT IN DIFFERENT-AGE GENERATIONS OF KELP SPECIES  
*HEDOPHYLLUM DENTIGERUM* FROM KAMCHATKA  
AND ITS LOSS DURING DRYING**

Klochkova N.G.<sup>1</sup>, Sizentsov N.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kamchatka Branch of Pacific Geographical Institute of FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Partizanskaya Str. 6.

<sup>2</sup> Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Pogranichnaya Str. 4.

Iodine deficiency in the soils of Kamchatka and the products grown there necessitates the use of iodine-containing supplements for their enrichment. The best of these are algal fertilizers and aqueous extracts, and the kelp species are the most promising for their production in Kamchatka. Our study of the iodine

content in *Hedophyllum dentigerum*, one of the most common representatives of kelp in Kamchatka, during its full maturity revealed that iodine varies among specimens of various ages, ranging from 0.24% of the absolute dry matter in yearlings to 0.42% in fourth-year-old specimens. We also found that algae actively lose molecular iodine during drying, and that the percentage of iodine loss varies among plants of various ages. It is highest in the oldest representatives of this species population. When air-dried at 18–20°C, they lose up to 19% of their original iodine content, and at 45°C, up to 30%. Thus, we concluded that *H. dentigerum* is promising for producing iodine-containing products and that the best way to preserve molecular iodine through sublimation is by freezing freshly harvested algae.

**Key words:** age-related development of kelp species, iodine, iodine deficiency, iodine accumulation, *Hedophyllum dentigerum*, Laminariales.

## ВВЕДЕНИЕ

Полноценное функционирование живых организмов невозможно без поступления к ним из внешней среды эссенциальных микро- и макроэлементов. Важнейшим среди них, необходимым для нормального функционирования всех живых организмов является йод. Его недостаток у человека и животных вызывает серьезные заболевания гормональной и репродуктивной систем, негативно отражается на развитии мозга и его когнитивных функций. Устраняется дефицит йода за счет его потребления в продуктах питания и питьевой воде. Лучше всего для этого подходят морепродукты, а среди них морские бурые водоросли.

У растений дефицит йода приводит к замедлению роста, нарушению процессов фотосинтеза и появлению хлороза, общему ослаблению иммунитета, деформации листьев, побегов и цветов [Степанова и др., 2020]. Последние часто опадают или дают низкий урожай плодов. Достаточное для развития растений количество йода, напротив, оказывает на них ростостимулирующее воздействие, усиливает устойчивость к фитопатогенам, неблагоприятным природным и антропогенным факторам, обеспечивает высокую товарную ценность производимой сельскохозяйственной продукции. Количество йода

в ней напрямую связано с уровнем его содержания в почве. Его аккумуляцию и миграцию в плодородном слое определяют ее агрофизические и агрохимические показатели, климатические условия, гранулометрический состав [Побилат, Волошин, 2020].

В Камчатском регионе, в том числе на площадях, используемых для выращивания сельскохозяйственной продукции, доминируют легкие высокопромываемые слоисто-охристые, слоисто-пепловые вулканические почвы. Ежегодное поздневесеннее таяние мощного снежного покрова, частые во время вегетационного сезона проливные дожди способствуют вымыванию из ее плодородного слоя минеральных солей и усиливают миграцию йода по ее профилю. В связи с этим для оптимизации питания культивируемых растений йодом на Камчатке необходимо применение йодсодержащих удобрений. Обычные минеральные удобрения могут дать кратковременный эффект, поскольку минеральный йод, представленный в них йодитами и йодатами, очень подвижен, он быстро вымывается из почвенного покрова и усваивается растениями хуже, чем органически связанный.

Для устранения в продукции растениеводства йододефицита используют методы ее биофортификации, направленные на искусственное повышение йодообеспеченности [Lawson et al., 2015]. Для этого используют йодсодержащие органические

удобрения. Лучшими из них являются свежие и компостированные морские водоросли или их экстракты для промачивания почвенного покрова или внекорневой обработки сельскохозяйственных культур. Последняя с точки зрения направленного и четко дозированного воздействия на растения даже предпочтительнее, поскольку позволяет рассчитать для каждого из них необходимые объемы использования экстракта и степень его разведения, обеспечивающего наибольшую эффективность биостимуляции растений [Begum et al., 2018; Rana et al., 2022; Mughunth et al., 2024].

Йод в той или иной мере содержат все морские водоросли, но ламинариевые среди многих из них выгодно отличаются широким распространением и значительной фитомассой. В прибрежных водах Восточной и Западной Камчатки их промысловые запасы формируют представители 11 родов. Сезонная динамика количественного содержания йода у них, а тем более у их разновозрастных генераций до сих пор никем не изучалась. Результаты исследований данной работы в этом отношении являются пионерными. В ней приводятся сведения о содержании йода у одного из наиболее массовых камчатских видов, *Hedophyllum dentigerum*, в период его полной зрелости, обсуждаются причины, обуславливающие различия в его накоплении у разновозрастных представителей вида, и предложено объяснение причин, приводящих к потерям молекулярного йода при высушивании образцов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использованные в настоящем исследовании образцы *H. dentigerum* были собраны в горле Авачинской губы (Юго-Восточная Камчатка) в районе кекуров Три Брата на глубине 6 м 02.10.2025 г. водо-

лазным способом. В ходе камеральной обработки на основании различий в морфологии и размерно-весовых показателях они были разделены на четыре возрастные группы, каждая из которых включала по 10–18 растений. В ходе биологического анализа у них определяли длину, максимальную ширину и массу пластин, длину, толщину и массу черешков, массу ризоидов. Далее из каждой возрастной группы были взяты наиболее типичные в морфологическом отношении слоевища. Из пластин были составлены пробы для определения содержания в них йода методом спектрофотометрии с использованием фотометра КФК-ЗОМЗ-3.

Йод определяли у свежесобранных замороженных образцов, хранившихся в морозильной камере при температуре минус 20°C; у образцов из того же сбора, высушенных при комнатной температуре 18–20°C до содержания влажности 18,5% и в термостате при температуре 45°C до сухого состояния. Данные, полученные в ходе аналитических исследований, в первом случае показывали количество миллиграммов йода в 100 г свежесобранных растений (Йод I), во втором – его содержание в сухой водорослевой массе, полученной при высушивании 100 г сырых водорослей при температуре 18–20°C (Йод II) и в третьем – его содержание в абсолютно сухой массе, полученной при высушивании 100 г сырых водорослей при температуре 45°C (Йод III).

Использованная нами методика определения йода, описанная ниже, была основана на экстракции йода из слоевищ водорослей четыреххлористым углеродом с последующим колориметрическим анализом. Для обеспечения высокой точности и воспроизводимости результатов были интегрированы и модифицированы элементы двух методик измерений: по ГОСТ 26185-84 «Водоросли морские, травы морские и про-

дукты их переработки» и МУК 4.1.747-99 «Определение концентраций химических веществ в воде централизованных систем питьевого водоснабжения». Разработанная нами методика включает 4 этапа.

1. *Процедура минерализации проб* взята из ГОСТ 26185-84, которая в определенных моментах была модифицирована. Для этого в ходе проведения предварительных экспериментов и сравнительного анализа результатов исследования были установлены оптимальный температурный режим и продолжительность процесса, а также скорректировано количественное соотношение щелочи и кислоты. Это позволило достичь максимальной эффективности минерализации и минимизации потерь извлекаемого из водорослевого сырья минерального йода.

Важным аспектом при обугливание органического материала является образование значительного количества карбонатов, что способствует улетучиванию части молекулярного йода при недостаточно полной минерализации проб. Для предотвращения этих потерь и обеспечения полного связывания йода была увеличена концентрация (т. е. количественное содержание) используемой щелочи.

Минерализацию и обугливание водорослевого материала проводили двухступенчато. В ходе минерализации каждый образец навеской до 2 г для свежих образцов и до 0,5 г для сухих заливали тремя миллилитрами раствора щелочи (гидроксида калия) с концентрацией 330 г/л, что гарантировало химическое связывание всех форм йода (молекулярного, минерального и органически связанного). Далее в течение 2 ч пробы постепенно нагревали в сушильном шкафу от 50 до 150°C. После этого образцы подвергали обугливание в течение 3 ч с постепенным повышением температуры от 200 до 500°C. Затем они

выдерживались при 500°C в течение 1 ч для полного обугливания. По завершении высокотемпературной обработки пробы медленно охлаждали в муфельной печи в течение 24 ч.

2. *Подготовка проб к экстракции йода*. Остывшие тигли извлекали из муфельной печи и добавляли в них дистиллированную воду, после чего вновь в течение 40 мин выдерживали в сушильном шкафу при 105°C для перевода водорастворимых компонентов в водную фазу с последующей фильтрацией. После этого обугленные остатки водорослей извлекали из тиглей и многократно промывали горячей дистиллированной водой на фильтре для максимального извлечения из них минерализованного йода. Объем полученных фильтратов при этом составлял 50–60 мл.

3. *Экстракция йода и его количественное определение*. В каждый фильтрат с помощью пипетки Мора добавляли 10 мл четыреххлористого углерода. Затем вносили по 5 мл раствора серной кислоты с концентрацией 250 г/л до достижения кислой реакции среды. После этого немедленно добавляли 1 мл раствора азотистокислого натрия и далее для интенсификации процесса экстракции йода фильтрат энергично перемешивали. Молекулярный йод окрашивал четыреххлористый углерод в характерный фиолетовый цвет.

4. *Проведение полного расслоения полученного экстракта*, содержащего молекулярный йод, на водно-эмульсионную и минеральную фазы занимало не менее 5–7 дней (такое же, как длительность подготовки калибровочных растворов). Окрашенный раствор декантировали или отбирали пипеткой Мора из конической колбы и погружали под слой дистиллированной воды. Это обеспечивало стабильность органической фазы и точность последующих спектрофотометрических измерений.

Результаты определения оптической плотности экстрактов вносили в таблицу. Для этого использовали формулу, выведенную из линии тренда в Excel, согласно данным, полученным из калибровочных растворов (рис. 1, 1).

Для обеспечения точности измерений и подтверждения линейности калибровочной зависимости калибровочные растворы

готовили в пределах ожидаемой концентрации анализируемых проб (рис. 1, 2). Все испытания, включая подготовку калибровочных растворов, проводили на фотометре в трехкратной повторности для получения статистически достоверного среднего результата. Полученные в ходе экспериментов результаты были подвергнуты статистическому анализу в программе Excel.

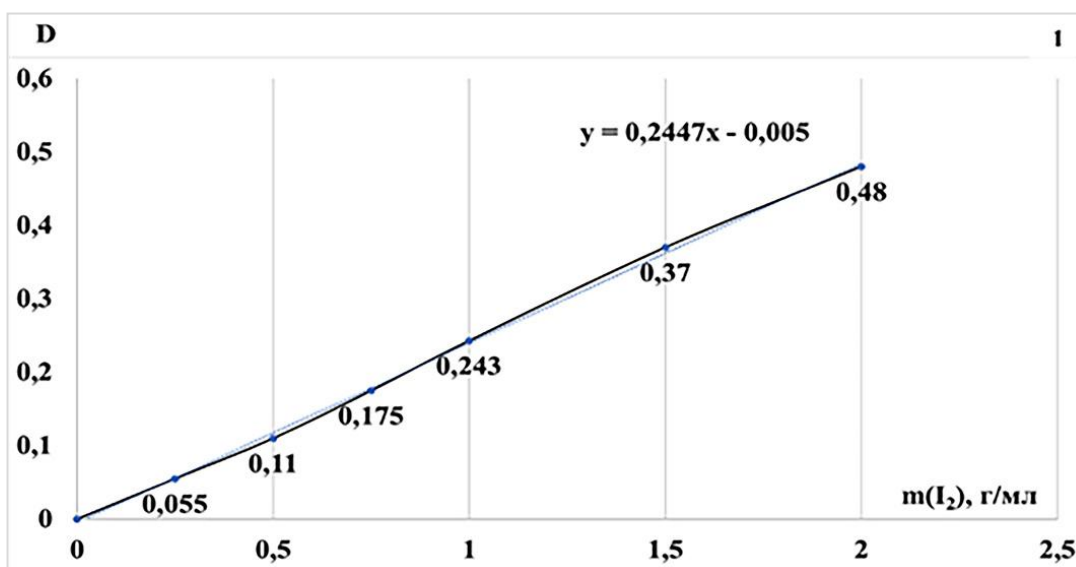


Рис. 1. Градуировочный график зависимости оптической плотности от массы молекулярного йода ( $D$  – оптическая плотность,  $m(I_2)$  – массовая концентрация) в экстракте (1) и калибровочные растворы для определения содержания йода (2)

Fig. 1. Calibration graph of the dependence of optical density on the mass of molecular iodine ( $D$  – optical density,  $m(I_2)$  – mass concentration) in the extract (1), and calibration solutions for determining iodine content (2)

Результаты проведенных экспериментов продемонстрировали минимальное отклонение от пределов проведенной нами калибровки, что служило гарантией высокой точности, воспроизводимости и надежности разработанной нами методики.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Выбранный для изучения вид бурых водорослей *H. dentigerum* принадлежит порядку Laminariales. Он является одним из четырех известных для прикамчатских вод представителей рода *Hedophyllum* и морфологически хорошо отличается от них, а также от видов других близкородственных родов, *Saccharina* и *Laminaria*, наличием у взрослых растений гладкой, не булированной, эластичной пластины и всегда длинного, блестящего округлого в нижних 2/3 и слабоуплощенного в верхней трети толстого черешка. У самых взрослых растений он может превышать 2 см в поперечнике. Пластины у этого вида рассечены на лопасти, достигают 3,2 м длины и 60 см ширины. Их толщина не превышает 3 мм, при этом краевая часть пластин всегда толще, чем центральная. Длина черешка в зависимости от условий обитания и возраста растений может меняться (рис. 2). Ризоиды хрящеватые, компактные, отходят по всей окружности черешка, образуют плотный пучок.

Для интерпретации результатов изучения количественного содержания *Йод I*, *Йод II* и *Йод III* в пластинах разновозрастных растений рассмотрим особенности их морфогенетического развития в каждом из четырех вегетационных сезонов и определим различия в темпах линейного роста пластин, черешков, скорости созревания тканей у разновозрастных генераций. Прежде всего отметим, что многолетними в слоевищах *H. dentigerum* являются черешки и ризоиды, которые последователь-

но от года к году удлиняются и утолщаются. Пластинчатая часть слоевища у данного вида, как и у многих других ламинариевых, является однолетней, поскольку каждую осень после спороношения она разрушается. Уходящие в зиму растения представляют собой черешки с остатками пластины 15–30 см длины. На этой части пластины сохраняется базальная меристема, функционирование которой обеспечивает формирование новой пластины. Некоторое время в ее верхней части присутствуют ороговевшие остатки прошлогодней пластины, но к середине весны они отрываются, когда молодая пластина начинает приобретать дигитатную, рассеченную на лопасти, форму. Отметим, что образцы *H. dentigerum*, использованные для определения содержания в них йода, находились в фертильном состоянии и имели хорошо развитые сорусы спорангиев.

В течение вегетационного сезона и в целом в течение жизни представители этого вида, как и других ламинариевых, проходят три фазы развития: активного линейного роста, созревания и старения. В зависимости от продолжительности жизни, длительность каждой из них разная, как и сроки жизни растений, зависящие от условий произрастания. Общая стратегия возрастного развития *H. dentigerum* в Авачинском заливе имеет следующий вид. С первого по второй год жизни морфофизиологические преобразования у растений направлены в основном на увеличение площади фотосинтетической поверхности путем активного роста черешка и пластины в длину и менее активного в толщину и ширину. В третий год жизни *H. dentigerum* имеет самые высокие темпы прироста длины и массы, в течение четвертого года, когда растения стареют, темпы их линейного роста несколько снижаются, при этом у них значительно увеличивается масса черешка и пластин.



Рис. 2. Внешний вид собранных в октябре разновозрастных образцов *Hedophyllum dentigerum*: 1 – трехлетние растения, 2 – четырехлетнее растение, завершающее вегетацию, с сеголетками, развивающимися на его ризоидальном пучке

Fig. 2. Appearance of *Hedophyllum dentigerum* specimens of various ages collected in October: 1 – three-year-old plants, 2 – a four-year-old plant at the end of its growing season, with yearlings developing on its rhizoids

Исследования предыдущих лет [Кусиди, Ключкова, 2009] показывают, что стратегия морфогенетического развития обсуждаемого вида отличается от таковой у других камчатских представителей рода *Hedophyllum*, живущих в ненарушенных условиях среды только 3 года (рис. 3). Это отражается на размерных показателях, свойственных разным возрастным генерациям вида. В расчетах, представленных на рисунке 3, их максимальные значения были приняты за 100%, остальные – за долю к ним.

Из приведенного ниже рисунка видно, что при существующих вариациях размеров у черешков и пластин в популяции *H. dentigerum* в горле Авачинской губы самую большую длину пластин и черешков среди всех разновозрастных генераций имеют представители не четвертого, как того следовало бы ожидать, а третьего года

жизни. В период полной зрелости средняя длина их пластин больше, чем у представителей первого, второго и четвертого годов вегетации на 16; 11 и 15,5% соответственно (рис. 3, 1). Наибольшую среднюю длину черешка имеют растения также третьего года жизни. До достижения этого возраста он последовательно увеличивается, на четвертом году средние показатели его длины уменьшаются в среднем на 10%, по сравнению с таковой у растений третьего года жизни (рис. 3, 2). Происходит это за счет сокращения в осенне-зимнее время количества наиболее длинночерешковых трехлетних растений. Штормами и в результате естественного прореживания зарослей вида большая их часть отрывается от субстрата, выбрасывается на берег, участвуя в формировании там валов штормовых выбросов.

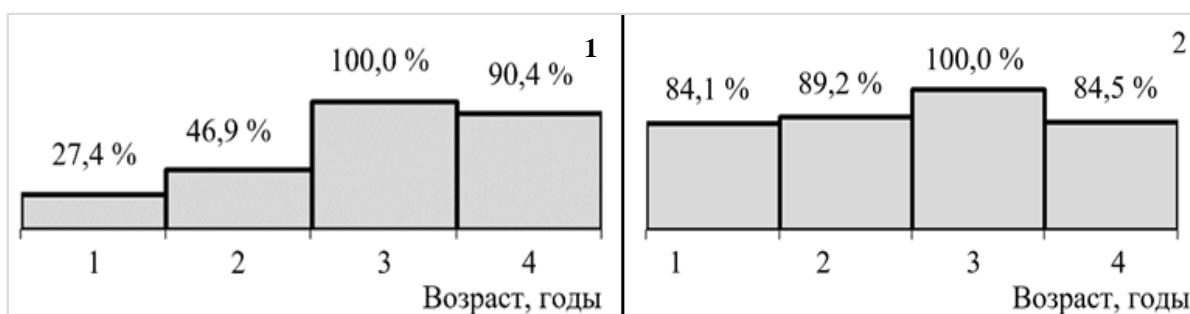


Рис. 3. Средние показатели длины пластин (1) и длины черешков (2) у разновозрастных растений *Hedophyllum dentigerum* из Авачинской губы, выраженные в относительных показателях

Рис. 3. Average length of blades (1) and stipes (2) in *Hedophyllum dentigerum* plants of different ages, expressed in relative terms

В таблице 1 указаны размерно-массовые характеристики разновозрастных образцов в пробе этого вида, использовавшейся для настоящего исследования. Объем выборок трех- и четырехлетних растений не позволил получить достоверные среднестатистические данные, поэтому в ней указан только размах колебания размеров и массы пластин и черешков.

Особенностью стратегии воспроизводства *H. dentigerum* является наличие только одного пика массового спороношения, а не двух, как у остальных представителей рода *Hedophyllum*. Он приходится на осеннее время, формирующиеся при этом сорусы спорангиев не имеют иероглифических очертаний, как у других видов рода, и покрывают почти всю поверхность пластины, оставляя стерильной только узкую полосу в ее базальной части и по самому краю. Массовый позднеосенний выход спор вызывает у этого вида, как было сказано выше, разрушение пластин. К середине декабря они практически целиком деградируют, особенно у второголетних и трехлетних растений.

Все образцы *H. dentigerum*, использованные в нашем исследовании, находились в фертильном состоянии и имели хорошо развитые, но еще не высypавшиеся целиком сорусы спорангиев. Пластины у раз-

новозрастных растений имели при этом разную степень зрелости и разрушения. Содержание в них воды и пластических веществ также было разным (табл. 2). Из представленной ниже таблицы видно, что наибольшую обводненность имели пластины у растений четвертого года жизни, а наименьшую – пластины растений второго года жизни.

Содержание йода в разных водорослевых пробах также сильно варьировало. Оно, как это видно из таблицы 2, изменяется с возрастом и неодинаковое при сравнении показателей *Йод I*, *Йод II* и *Йод III* у одних и тех же возрастных групп. Из таблицы видно, что накопление йода в пластинах *H. dentigerum* в разные годы вегетации разное. У свежемороженых растений его количество варьирует: самое минимальное, 53,5 мг/на 100 г сырья, у растений третьего года жизни и наибольшее, 83,1 мг/на 100 г сырья, – у самых старых четырехлетних растений. Это, на наш взгляд, напрямую связано с особенностями роста растений и формирования ими пластин. На первом году жизни растения вырастают от микроскопических до достаточно крупных слоевищ. Синтез пластических веществ в этом случае сопровождается их активным использованием в цитокинетических процессах. Вклад в спороношение

представителей этой генерации не велик, содержание у них к осени пластических веществ меньше, чем к концу второго года жизни (табл. 2), длина черешка почти не изменяется (табл. 1). Поскольку синтезированные пластиной пластические вещества на рост растения почти не тратят, основной стратегией их развития в эти годы становится их накопление, сопровождающееся, судя по всему, активной полимеризацией полисахаридов. В ходе третьего года развития растения формируют самые длинные за период вегетации пластины, у них заметно увеличивается и длина черешков. Это вновь требует значительного потребления пластических веществ.

Четырехлетние растения имеют самые толстые за период вегетации пластины, 3/4 толщины которых занимает медуллярная ткань. Межклеточное пространство между тонкими гифами и ситовидными трубками сердцевины заполняется большим количеством альгиновой слизи. В октябре представители этой возрастной группы активно размножаются. Вместе с зооспорами растения теряют большое количество пластических веществ и сильно обводняются. В присутствии воды высокомолекулярные длинноцепочечные полисахариды формируют плотный гель, поскольку фукоидан и альгиновые кислоты, как известно, обладают высокой гидрофильностью.

Таблица 1. Размерно-массовые показатели у разновозрастных представителей *Hedophyllum dentigerum*, собранной в горле Авачинской губы 02.10.2025 г.

Table 1. Size and weight characteristics of *Hedophyllum dentigerum* specimens of different ages collected in the throat of the Avacha Bay on October 2, 2025

Возраст растений	Показатели	Размерно-массовые характеристики (min – max/среднее)					
		длина пластины, см	длина черешка, см	ширина пластины, см	масса пластины, г	масса черешка, г	количество лопастей пластины
Первый год	мин. – макс.	37–180	7–14	8,5–58	62–249,5	3,5–15	1–4
Второй год	мин. – макс.	47–140	10–16,5	19–42	102,5–327	12–38	2–7
Третий год	мин. – макс.	70–118	14–50	30–43	159–485	23–67	5–8
Четвертый год	мин. – макс.	50–170	16–41	33–46	174–514	28–109	4–9

Таблица 2. Содержание йода в свежесобранных и высушенных при разной температуре пластинах разновозрастных представителей *Hedophyllum dentigerum*

Table 2. Iodine content in blades of different ages of *Hedophyllum dentigerum*, freshly harvested and dried at different temperatures

Возраст растений	Количество воды в свежесобранных пластинах		Количество абсолютно сухого вещества		Содержание йода, мг/на 100 г сырья			Йод III, % от абсолютно сухого вещества
	%	г/кг	%	г/кг	Йод I	Йод II	Йод III	
Первый год	81,97	819,7	18,03	180,3	55,4387	48,2210	43,6469	0,24
Второй год	81,28	812,8	18,72	187,2	66,8663	62,6388	60,8099	0,32
Третий год	82,91	829,1	17,09	170,9	53,5133	47,7719	44,2325	0,26
Четвертый год	86,15	861,5	13,85	138,5	83,0547	67,2480	58,1098	0,42
В среднем для вида	83,08	830,8	16,92	169,2	64,7183	56,4699	51,6997	0,31

Молекулярный йод, проникая в гель, способен к комплексообразованию [Панов, 2012]. Механизм его связывания с альгиновыми кислотами базируется на электростатическом взаимодействии между его положительно заряженными ионами (например,  $I^+$  или  $I_3^-$  в зависимости от окислительно-восстановительного состояния среды) и отрицательно заряженными карбоксильными группами ( $-COO^-$ ) альгиновых кислот. Значительную роль в этом процессе играет адсорбция йода на поверхности полимерной матрицы альгиновых кислот, поскольку их пространственная структура, характеризующаяся наличием межпочечного пространства молекул и развитой удельной поверхностью, способствует электростатической адсорбции молекул йода. Видимо, этим объясняется более высокое йодосодержание в пластинах второгодних и четырехлетних растений, активно накапливающих пластические вещества и полисахариды.

Из таблицы 2 видно, что наибольшее количество йода имеют свежемороженые пластины, содержащийся в них молекулярный йод при отрицательных температурах и в отсутствие света мало подвижен, вследствие чего количественное содержание всех форм йода, молекулярного, минерального и органически связанного, в свежем и замороженном материале, скорее всего, одинаково. Высушивание замороженного материала при комнатной температуре приводит к заметной потере количественного содержания йода в пробах всех возрастных групп, но его, по-прежнему, больше всего у представителей четвертого года жизни, а меньше всего – у третьего. Более высокое температурное воздействие на водоросли приводит к еще большей потере йода. Мы полагаем, что это происходит за счет высвобождения молекулярного йода в ходе смыкания

в высыхающем геле межпочечных пространств и разрушения комплексных соединений. Относительные показатели объема этих потерь от его исходного содержания в свежемороженых пластинах (Йод I), принятого за 100%, при поэтапном высушивании проб разновозрастных пластин показаны ниже (табл. 3).

Таблица 3. Потери йода (%) при высушивании свежемороженых пластин *Hedophyllum dentigerum*

Table 3. Iodine loss (%) during drying of fresh-frozen *Hedophyllum dentigerum* blades

Возраст растений	Высушивание до воздушно-сухого состояния	Высушивание до абсолютно сухого состояния
Однолетние	13,02	21,27
Двухлетние	6,32	9,06
Трехлетние	10,73	17,34
Четырехлетние	19,03	30,03
<i>В среднем для вида</i>	<i>12,75</i>	<i>20,12</i>

Данные этой таблицы свидетельствуют о том, что самое большое количество йода в ходе сушки теряют четырехлетние растения. При высокотемпературной сушке оно достигает 30%. Самые малые его потери наблюдаются при высушивании растений второго года жизни. Это, на наш взгляд, свидетельствует о более низком содержании у их представителей молекулярного йода, испаряющегося при температурном воздействии. Так, потери йода у однолетних растений более чем вдвое больше, чем у двухлетних, и почти на 4%, чем у растений третьего года жизни.

Йод и его содержание у *H. dentigerum* определяют ценность этого вида как природного источника этого элемента, необходимого для нормального развития всех живых организмов. Выше говорилось о том, что для биофортификации продукции растениеводства на Камчатке необходимо

использование йодсодержащих препаратов путем внесения их в почву или внекорневой обработки растений. Относительное содержание йода в абсолютно сухом веществе у *H. dentigerum* составляет в среднем 0,31%. У самых старовозрастных образцов осенью – 0,42%. При этом следует учесть, что изначально у свежесобранных растений его на 30% больше.

В научной литературе по химическому составу камчатских видов ламинариевых, к сожалению, отсутствуют сведения о накоплении йода в осенний период. В этом отношении исключение составляет работа Е.И. Кальченко с соавторами [Кальченко и др., 2008], в которой приводятся сведения о том, что с мая по октябрь включительно его количество у *Hedophyllum bongardianum* увеличивается от 0,01 до 0,1% от сухого вещества. В более позднее время, в августе, содержание йода достигает 0,25% [Аминина, Клочкова, 2002]. У летней *Alaria esculenta* его еще меньше – до 0,06 и 0,07% от сухого вещества [Конева, Аминина, 2013; Аминина, 2014]. В работе Н.М. Аминой с соавторами [2007] приводятся данные по содержанию йода у 13 промысловых и потенциально промысловых ламинариевых водорослей российского Дальнего Востока, и среди них 6 видов, собранных у Камчатки. Время их сбора она, к сожалению, не указывает. Анализ приведенных в цитируемой работе данных показывает, что йод в общем составе абсолютно сухого вещества у разных видов колеблется от  $(0,01 \pm 0,002)$  у *Costaria costata* до  $(0,25 \pm 0,04)\%$  у *Laminaria gurjanovae* (в настоящее время показано, что этот вид принадлежит к азиатской популяции *Saccharina latissima*).

Анализ литературных источников, содержащих сведения о накоплении йода ламинариевыми водорослями, произрастающими в других географических районах, свидетельствует о том, что в Белом море

у *Laminaria digitata* и *Saccharina latissima* его максимальное количество, по сумме минерального и органического йода, в середине июня не превышает 0,23% [Подковытова и др., 2025].

В Государственном реестре лекарственных средств Российской Федерации в качестве йодсодержащих растений указываются представители семейства *Laminariaceae* (*Laminaria saccharina*, *Laminaria japonica*). При этом Государственная фармакопея Российской Федерации XIV издания нормирует нижний предел содержания йода (не менее 0,1%) в фармакопейных видах слоевищ ламинарии [Щукин и др., 2025; Государственная фармакопея..., <https://docs.ruclm.ru/feml/pharma/v14/vol4/999/>]. Изучаемый нами вид в состоянии полной зрелости, осенью, содержит гораздо большее количество йода. Он, следовательно, является ценным сырьем для получения йодсодержащей водорослевой продукции, в том числе для растениеводства с целью биофортификации продукции и улучшения качества почвы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные нами исследования показали, что имеющиеся в научной литературе данные по содержанию йода, как доли от абсолютно сухой массы водорослей, не отражают его реального содержания в свежесобранном сырье. В нем оно значительно выше. У четырехлетних растений на 30%. Накопление йода у разновозрастных представителей *H. dentigerum* происходит по-разному и зависит от особенностей анатомо-морфологического развития пластин в разные годы вегетации. Наибольшее оно у представителей самой старшей возрастной группы и может составлять до 830 г на одну тонну сырья. У других возрастных групп оно меньше.

В статье высказано предположение о том, что накоплению и удержанию в тканях водорослей молекулярного йода способствует формирование у него слабых функциональных связей с такими входящими в состав водорослей органическими компонентами гелеобразователями, как фукоидан и альгинат. Их обеспечивают донорно-акцепторные связи, статические, адсорбционные силы и образование мгновенного (наведенного) диполя. Вода в тканях живых растений также способствует образованию слабостабильных соединений с участием йода.

Для максимального удержания йода в воздушно-сухом сырье и особенно в водорослевых экстрактах необходима, на наш взгляд, разработка методов использования стабилизирующих веществ, способных связывать и удерживать молекулярный йод в прочные соединения или переводить его в минерализованное состояние, путем фиксации на инертном носителе.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Настоящая работа выполнена по теме гранта РНФ «Разработка технологии извлечения биостимуляторов роста растений из камчатских морских водорослей. Апробация их росто- и иммунопротекторного воздействия на выращиваемые на Камчатке тепличные культуры» (№ 25-26-20128; eLIBRARY ID: 80590890, EDN: DASANC).

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### ЛИТЕРАТУРА

Аминина Н.М. 2015. Сравнительная характеристика бурых водорослей прибреж-

ной зоны Дальнего Востока. *Известия ТИНРО*. Т. 182. С. 258–268.

Аминина Н.М., Вишневская Т.И., Гурулева О.Н. и др. 2007. Состав и возможности использования бурых водорослей дальневосточных морей. *Вестник ДВО РАН*. № 6 (136). С. 123–130.

Аминина Н.М., Клочкова Н.Г. 2002. Перспективы развития производства по переработке водорослей на побережье Камчатки. *Рыболовство России*. Т. 1. С. 54–56.

Государственная фармакопея Российской Федерации. ФС 2.5.0080.18. Ламинарии слоевища (морская капуста). XIV изд. URL: <https://docs.ruclm.ru/feml/pharma/v14/vol4/999/>.

Кальченко Е.И., Аминина Н.М., Гурулева О.Н. и др. 2008. Химический состав *Laminaria bongardiana* из Авачинского залива. *Известия ТИНРО*. Т. 155. С. 347–354.

Конева А.А., Аминина Н.М. 2013. Химический состав различных частей слоевища *Alaria marginata* P. et R. (Laminariales, Phaeophyta). *Известия ТИНРО*. Т. 175. С. 333–338.

Кусиди А.Э., Клочкова Н.Г. 2009. Стратегия возрастного и сезонного развития *Saccharina dentigera* (Phaeophyta, Laminariales) у Восточной Камчатки. *Исследование водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана*. Вып. № 14. С. 14–19.

Панов Д.О. 2012. Биокмпозиты йода с полисахаридами. *Ученые записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского. Серия «Биология. Химия»*. Т. 25 (64). № 3. С. 304–308.

Подкорытова А.В., Рощина А.Н., Евсеева Н.В. и др. 2020. Бурые водоросли порядков Laminariales и Fucales Сахалино-Курильского региона: запасы,

- добыча, использование. *Труды ВНИРО*. Т. 181. С. 235–256.
- Подкорытова А.В., Рощина А.Н., Евсеева Н.В. и др. 2025. Бурые водоросли *Saccharina latissima* и *Laminaria digitata* Белого моря: биохимическая, технологическая характеристики и практическое применение. *Труды ВНИРО*. Т. 200. С. 61–79.
- Побилат А.Е., Волошин Е.И. 2020. Мониторинг йода в системе «почва – растение» (обзор). *Вестник Краснодарского государственного аграрного университета*. № 10. С. 101–108.
- Степанова О.В., Синдирева А.В., Вешкурцева С.С. и др. 2020. Экологическая оценка действия йода на начальные показатели роста и развития зерновых культур. *Проблемы региональной экологии*. № 2. С. 33–38.
- Щукин В.М., Кузьмина Н.Е., Хорольская Е.А. и др. 2025. Нормирование содержания йода в слоевищах ламинарии и продуктах на их основе: изменение подходов в рамках риск-ориентированной стратегии в контроле качества лекарственных средств. *Фармация и фармакология*. Т. 13. № 1. С. 44–55.
- Lawson P.G., Daum D., Czauderna R. et al. 2015. Soil versus foliar iodine fertilization as a biofortification strategy for field-grown vegetables. *Frontiers in Plant Science*. № 6. P. 450.
- Begum M., Bordoloi B.C., Singha D.D. et al. 2018. Role of seaweed extract on growth, yield and quality of some agricultural crops: A review. *Agricultural Reviews*. Vol. 39. Iss. 4. P. 321–326.
- Mughunth R.J., Velmurugan S., Mohanalakshmi M. et al. 2024. Review of seaweed extract's potential as a biostimulant to enhance growth and mitigate stress in horticulture crops. *Scientia Horticulturae*. Vol. 334. P. 113312.
- Rana V.S., Lingwal K., Sharma S. et al. 2022. Biostimulatory effect of seaweed extract on the fruiting and runner production of strawberry. *Emergent Life Sciences Research*. Vol. 8. P. 132–141.

## REFERENCES

- Aminina N.M. 2015. Comparative characteristics of brown algae of the coastal zone of the Far East. *Izvestiya TINRO (News of the Pacific Institute of Fishery and Oceanography)*. Vol. 182. P. 258–268 (in Russian).
- Aminina N.M., Vishnevskaya T.I., Guruleva O.N. et al. 2007. Composition and possibilities of using brown algae of the Far Eastern seas. *Vestnik DVO RAN (Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences)*. № 6(136). P. 123–130 (in Russian).
- Aminina N.M., Klochkova N.G. 2002. Prospects for the development of seaweed processing production on the coast of Kamchatka. *Rybolovstvo Rossii (Fisheries of Russia)*. Vol. 1. P. 54–56 (in Russian).
- State Pharmacopoeia of the Russian Federation. FS 2.5.0080.18. *Laminaria thallus (kelp)*. 14th edition. URL: <https://docs.ruclm.ru/feml/pharma/v14/vol4/999/> (in Russian).
- Kalchenko E.I., Aminina N.M., Guruleva O.N. et al. 2008. Chemical composition of *Laminaria bongardiana* from Avacha Bay. *Izvestiya TINRO (The News of the Pacific Institute of Fisheries and Oceanography)*. Vol. 155. P. 347–354 (in Russian).
- Koneva A.A., Aminina N.M. 2013. Chemical composition of various parts of the stratum of *Alaria marginata* P et R. (Laminariales Phaeophyta). *Izvestiya TINRO (The News of the Pacific Institute of Fisheries and Oceanography)*. Vol. 175. P. 333–338 (in Russian).
- Kusidi A.E., Klochkova N.G. 2009. Growth and seasonal development strategy of

- Saccharina dentigera* (Phaeophyta, Laminariales) on East Kamchatka. *Issledovaniya vodnyh biologicheskikh resursov Kamchatki i severo-zapadnoj chasti Tihogo okeana (The researches of the aquatic biological resources of Kamchatka and the North-West Part of the Pacific Ocean)*. Iss. 14. P. 14–19.
- Panov D.O. 2012. Biocomposites of iodine with polysaccharides. *Uchenyye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Seriya "Biologiya. Khimiya" (Scientific Notes of the V.I. Vernadsky Tauride National University. Series "Biology. Chemistry")*. Vol. 25(64). № 3. P. 304–308 (in Russian).
- Podkorytova A.V., Roshchina A.N., Evseeva N.V. et al. 2020. Brown algae of the orders Laminariales and Fucales of the Sakhalin-Kuril region: reserves, fishing, using. *Trudy VNIRO (Proceedings of the All-Russian Institute of Fisheries and Oceanography)*. Vol. 181. P. 235–256 (in Russian).
- Podkorytova A.V., Roshchina A.N., Evseeva N.V. et al. 2025. Brown algae *Saccharina latissima* and *Laminaria digitata* of the White Sea: biochemical, technological characteristics and practical application. *Trudy VNIRO (Proceedings of the All-Russian Institute of Fisheries and Oceanography)*. Vol. 200. P. 61–79 (in Russian).
- Pobilat A.E., Voloshin E.I. 2020. Monitoring iodine in the soil-plant system (review). *Vestnik Krasnodarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Bulletin of the Krasnodar State Agrarian University)*. № 10. P. 101–108 (in Russian).
- Stepanova O.V., Sindireva A.V., Veshkurtseva S.S. et al. 2020. Ecological assessment of the effect of iodine on the initial growth and development indicators of grain crops. *Problemy regional'noy ekologii (Problems of Regional Ecology)*. № 2. P. 33–38 (in Russian).
- Shchukin V.M., Kuzmina N.E., Khorolskaya E.A. et al. 2025. Standardization of iodine content in kelp thalli and products based on them: changing approaches within the framework of a risk-oriented strategy in drug quality control. *Farmatsiya i farmakologiya (Pharmacy and Pharmacology)*. Vol. 13. № 1. P. 44–55 (in Russian).
- Lawson P.G., Daum D., Czauderna R. et al. 2015. Soil versus foliar iodine fertilization as a biofortification strategy for field-grown vegetables. *Frontiers in Plant Science*. № 6. P. 450.
- Begum M., Bordoloi B.C., Singha D.D. et al. 2018. Role of seaweed extract on growth, yield and quality of some agricultural crops: A review. *Agricultural Reviews*. Vol. 39. Iss. 4. P. 321–326.
- Mughunth R.J., Velmurugan S., Mohanalakshmi M. et al. 2024. Review of seaweed extract's potential as a biostimulant to enhance growth and mitigate stress in horticulture crops. *Scientia Horticulturae*. Vol. 334. P. 113312.
- Rana V.S., Lingwal K., Sharma S. et al. 2022. Biostimulatory effect of seaweed extract on the fruiting and runner production of strawberry. *Emergent Life Sciences Research*. Vol. 8. P. 132–141.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Клочкова Нина Григорьевна** – Камчатский филиал Тихоокеанского института географии ДВО РАН; 683000, Россия, Петропавловск-Камчатский; доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории экологии растений; ninakl@mail.ru. SPIN-код: 4701-2618, Author ID: 344281; Scopus ID: 6602583957; Researcher ID: R-5660-2016; ORCID: 0000-0003-3430-4056.

**Klochkova Nina Grigorievna** – Kamchatka Branch of Pacific Geographical Institute of FEB RAS; 683000, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Doctor of Biological Sciences, Chief Researcher of Plant Ecology Laboratory; ninakl@mail.ru. SPIN-code: 4701-2618, Author ID: 344281; Scopus ID: 6602583957; Researcher ID: R-5660-2016; ORCID: 0000-0003-3430-4056.

**Сизенцов Никита Анатольевич** – Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга; 683032, Россия, Петропавловск-Камчатский; младший научный сотрудник лаборатории биогеохимии и рекреационных ресурсов; nekitas90@mail.ru. SPIN-код: 1159-5098, Author ID: 1209010.

**Sizentsov Nikita Anatolievch** – Vitus Bering Kamchatka State University; 683032, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Junior Researcher of Biogeochemistry and Recreational Resources Laboratory; nekitas90@mail.ru. SPIN-code: 1159-5098, Author ID: 1209010.

Статья поступила в редакцию 31.03.2026; одобрена после рецензирования 08.06.2026; статья принята к публикации 16.06.2026.

The article was submitted 31.03.2026; approved after reviewing 08.06.2026; accepted for publication 16.06.2026.

Для цитирования: Ключкова Н.Г., Сизенцов Н.А. 2026. Содержание йода у разновозрастных поколений камчатской ламинариевидной водоросли *Hedophyllum dentigerum* и его потери при их высушивании. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. Вып. 76. С. 58–72. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2026-76-58-72>.

For citation: Klochkova N.G., Sizentsov N.A. 2026. Iodine content in different-age generations of kelp species *Hedophyllum dentigerum* from Kamchatka and its loss during drying. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta (Bulletin of Kamchatka State Technical University)*. Iss. 76. P. 58–72 (in Russian). <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2026-76-58-72>.

Научная статья

УДК 579.68

DOI: 10.17217/2079-0333-2026-76-73-83

## МИКРОФЛОРА СЕЛЬДИ И ШПРОТА ИЗ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Рыков Н.А., Науменко Е.Н., Авдеева Е.В.

Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, пр-кт Советский, 1.

В настоящей работе было проведено исследование микрофлоры массовых промысловых видов рыб Балтийского моря – сельди (*Clupea harengus* Linnaeus, 1758) и шпрота (*Sprattus sprattus* Linnaeus, 1758). Пробы отбирали в юго-восточной части Балтийского моря. Использовали общепринятые методы бактериологических исследований. Микрофлора сельди была представлена 20 видами бактерий, относящихся к 10 родам, среди которых 11 видов сапрофитных, 7 видов патогенных и 2 вида кишечных бактерий. Среди сапрофитных бактерий преобладали представители родов *Campylobacter*, *Acinetobacter* и *Bacillus*. В микрофлоре шпрота было обнаружено 19 видов бактерий, принадлежащих к следующим родам: *Bacillus*, *Aeromonas*, *Clostridium*, *Corinebacterium*, *Acinetobacter*, *Enterobacter*, *Veilonella*, *Pseudomonas*, *Kurthia* и *Microbacterium*. Высказывается предположение, что аэромонады и псевдомонады могут стать причиной возникновения инфекций у этих рыб.

**Ключевые слова:** Балтийское море, микрофлора бактерий, *Clupea harengus*, *Sprattus sprattus*.

Original article

## MICROFLORA OF HERRING AND SPRATTUS FROM THE SOUTHEAST PART OF THE BALTIC SEA

Rykov N.A., Naumenko E.N., Avdeeva E.V.

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Sovetsky Ave. 1.

In this study, we examined microflora of the most abundant commercial fish species from the Baltic Sea, such as herring (*Clupea harengus* Linnaeus, 1758) and sprat (*Sprattus sprattus* Linnaeus, 1758). We collected samples from the southeast part of the Baltic Sea. Generally accepted methods of bacteriological research were used. We identified 20 species of bacteria belonging to 10 genera in the microflora of herring, including 11 species of saprophytic, 7 species of pathogenic and 2 species of intestinal bacteria. Among saprophytic bacteria, *Campylobacter*, *Acinetobacter* and *Bacillus* were the most abundant. As to the microflora of sprat, 19 bacterial species belonging to the following genera were found – *Bacillus*, *Aeromonas*, *Clostridium*, *Corinebacterium*, *Acinetobacter*, *Enterobacter*, *Veilonella*, *Pseudomonas*, *Kurthia*, and *Microbacterium*. As we concluded, aeromonads and pseudomonads might be the cause of infections in these fish species.

**Key words:** Baltic Sea, bacterial microflora, *Clupea harengus*, *Sprattus sprattus*.

## ВВЕДЕНИЕ

Рыбы семейства сельдевых являются важными объектами мирового и российского промысла. В связи с этим важно знать возможных возбудителей заболеваний этих рыб и их опасность для человека. Балтийская сельдь (*Clupea harengus* Linnaeus, 1758) – морская пелагическая рыба. Держится преимущественно в верхних слоях воды. Половой зрелости достигает на 2–3-м году жизни при длине 16–18 см. Продолжительность жизни до 11 лет. Максимальная длина 37 см. Имеет две формы по времени нереста: весенне- и осенне-нерестующую. Весенне-нерестующая сельдь также делится на две группы: прибрежную, обитающую в юго-восточной части Балтийского моря, с более быстрым темпом роста и коротким жизненным циклом, а также морскую, мигрирующую из северных и северо-западных частей Балтийского моря, с замедленным темпом роста в первые годы жизни и более продолжительным жизненным циклом. Численное соотношение между этими формами изменяется под воздействием колебаний условий среды и обеспеченности пищей [Бирюков, 1970].

Балтийский шпрот питается планктонными рачками, главным образом эвритеморой (*Eurytemora affinis* (Poppo, 1880)). На втором году жизни достигает длины 7,5–11,2 см, на третьем – 10,6–14,1, на четвертом – 12,6–15,0 см, накапливая от 4,1 до 15,2% жира. Наиболее жирен бывает осенью и зимой, наименее жирен в период нереста, с апреля по июль. Половой зрелости достигает обычно при длине 12 см, реже с 8,5–9 см длины. Для нереста шпрот отходит от берегов и выметывает свою плавучую икру главным образом над глубинами 50–100 м при солености от 4–5 до 17–18 промилле и температуре воды

около 16–17°C. Балтийский шпрот, как и балтийская сельдь, – планктоноядная рыба, частично конкурирует с сельдью из-за пищи.

Насколько нам известно, у балтийской сельди вспышки вирусных и микозных заболеваний не регистрировались, бактериальные заболевания также не изучались. Изучением биологии и паразитофауны сельди занимались сотрудники Атлантического филиала ФГБНУ «ВНИРО» [Бирюков, 1970; Гаевская, 1986; Гаевская, Ковалева, 1975, 1991; Груднев, 1998], а также иностранные ученые [Попель, Стшижевска, 1971; Реймер, 1970]. Что касается шпрота, был проведен ряд исследований по физиологии, паразитофауне, пространственному распределению и воспроизводству этих рыб [Бирюков, 1970; Апс, 1981; Труфанова, 2015; Красовская, 2022]. Однако сведения о болезнях шпрота отсутствуют.

Работы Л.В. Реймера [1970] описывали миграции сельди в Балтийском море. Изучением заражения данной рыбы такими паразитами, как кокцидии, нематоды и др., занимались А.В. Гаевская, М.А. Груднев и другие авторы [Гаевская, Ковалева, 1975; Гаевская, 1986; Гаевская, Ковалева, 1991; Груднев, 1998]. Исследования проводились также польскими учеными [Попель, Стшижевска, 1971]. Изучалось воспроизводство и динамика численности [Красовская, 2022], сезонное распределение российских уловов и размерно-возрастной состав балтийской сельди с 1992 по 2015 гг. [Труфанова, 2017]. Имеются отдельные сведения о микрофлоре сельди из Вислинского (Калининградского) залива [Авдеева 2017а; Березовская, Авдеева, 2019].

Таким образом, анализ литературных данных показывает, что микрофлора сельди и шпрота в Балтийском море практически не изучена. Целью нашей работы является изучение микрофлоры сельди

и шпрота в районе Куликовской бухты (юго-восточная часть Балтийского моря).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пробы отбирали в юго-восточной части Балтийского моря в 2022–2023 гг. из промысловых уловов. Нами было исследовано 105 экземпляров сельди и 45 экземпляров шпрота. Сельдь имела промысловую длину от 14 до 23 см, средняя длина была 18,5 см. Шпрот имел промысловую длину от 10 до 13 см, средняя длина была 11,5 см.

Осуществляли посевы с кожи, жабр, содержимого брюшной полости (экссудат), крови, желчи, печени, половых продуктов и почек. Для посева использовали рыбо-пептонный агар [Авдеева, 20176]. Галофильные среды нами не применялись в связи с тем, что исследуемый район опреснен и, следовательно, галофильные микроорганизмы не в состоянии в нем выжить. Органы отбирали кусочком и помещали на рыбо-пептонный агар [Авдеева, 20176; Головина и др., 2016]. Колонии бактерий пересеивали на скошенный агар или среду Клиглера. У бактерий описывали культуральные признаки.

Для определения морфологических признаков бактерий культуры клеток окрашивали традиционным методом по Граму [Головина и др., 2016]. Под микроскопом определяли грампринадлежность и форму бактерий, а также чистоту культур [Авдеева, 20176].

Для дифференциации бактерий проводили тест на оксидазу. Оксидазоположительные колонии синеют, а оксидазоотрицательные не изменяют цвет [Головина и др., 2016; Авдеева, 20176]. На среде РПЖ (рыбо-пептонная желатина) определяли наличие у бактерий протеолитических ферментов. Для целей идентификации грамположительных бактерий проводили

тест на наличие каталазы. Для этого использовали 3,0%-ную перекись водорода. Далее на среде Хью – Лейфсона определяли способность бактерий разлагать глюкозу в аэробных и анаэробных условиях. Среды Гисса с углеводами: глюкозой, лактозой, сахарозой, мальтозой, маннитом и арабинозой применяли для учета способности бактерий разлагать углеводы до кислот и газов [Головина и др., 2016; Авдеева, 20176]. Изменение цвета среды указывало на образование кислоты (уксусной, молочной и др.), а разрыв, вспенивание или растрескивание указывали на выделение газа ( $H_2$  или  $CO_2$ ).

Для определения способности бактерий ферментировать такие углеводы, как глюкоза, сахароза и лактоза, образовывать сероводород и газ использовали агар Клиглера. Способность бактерий ферментировать лактозу определяли по пожелтению скошенной части среды, глюкозу – по пожелтению столбика, газ – по наличию пузырьков или разрывов в среде, сероводород – по почернению среды [Головина и др., 2016; Авдеева, 20176].

Образование индола определяли, подвешивая индикаторную бумажку, пропитанную 12%-ным водным раствором щавелевой кислоты в рыбо-пептонный бульон [Ларцева и др., 2008]. На среде Кларка устанавливали образование ацетилметилкарбинола и метилрота. При положительной реакции появляется красное окрашивание среды, при отрицательной реакции – среда становится желтого цвета. На рыбо-пептонном бульоне с калийной селитрой определяли редукцию нитратов в нитриты. Применяли гидролиз эскулина для идентификации грамположительных бактерий. Коричневая окраска среды свидетельствует о гидролизе эскулина. По культуральным, морфологическим и физиолого-биохимическим признакам бактерии опреде-

ляли по [Определитель бактерий Берджи, 1997а, 1997б].

Для анализа сходства видового состава микрофлоры сельди и шпрота рассчитывали коэффициент Чекановского [Czekanowski, 1932]:

$$Kc = 2c / (a + b),$$

где  $a$  – число видов в местообитании А;

$b$  – число видов в местообитании В;

$c$  – число видов, встречающихся одновременно в обоих местообитаниях.

Статистическая обработка проводилась в программе Statistica 6.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В наших исследованиях у сельди было обнаружено 20 видов бактерий. В коже – 3 вида родов *Bacillus*, *Acinetobacter*, *Enterobacter*; на жабрах – 3 вида (*Bacillus*, *Acinetobacter*, *Enterobacter*); в половых продуктах – 5 видов (*Acinetobacter*, *Campylobacter*, *Anaerobic*, *Pseudomonas*); на сердце – 4 вида (*Pseudomonas*, *Aeromonas*); в желудочно-кишечном тракте – 3 вида (*Bacillus*, *Pseudomonas*); в почках – 4 вида (*Listeria*, *Kurthia*, *Bacillus*, *Microbacterium*); в печени – 8 видов (*Aeromonas*, *Bacillus*, *Streptococcus*, *Pseudomonas*). В целом микрофлора сельди включала 7 видов условно-патогенных, 2 вида санитарно-показательных и 11 видов сапрофитных бактерий (рис., 1). Также нами было выделено 11 видов сапрофитных бактерий, принадлежащих к семи родам: *Campylobacter*, *Acinetobacter*, *Bacillus*, *Listeria*, *Anaerobic*, *Kurthia*, *Microbacterium* (рис., 3). Среди них преобладали обычные представители микрофлоры рыб – *Bacillus*, *Acinetobacter*, *Campylobacter* (табл. 1).

У шпрота было обнаружено 19 видов бактерий, включая представителей рода *Bacillus* – 9 видов, *Enterobacter* – 2 вида,

*Aeromonas* – 1 вид, *Pseudomonas* – 1 вид, *Acinetobacter*, *Clostridium*, *Corynebacterium*, *Kurthia*, *Microbacterium*, *Veillonella* – по одному виду (см. табл. 2), т. е. 14 видов сапрофитных бактерий, 2 вида бактерий группы кишечной палочки и 3 вида условно-патогенных бактерий (рис., 2).

У шпрота выделено 14 видов сапрофитных бактерий, включая 9 видов рода *Bacillus* и по одному виду родов *Clostridium*, *Acinetobacter*, *Veillonella*, *Kurthia*, *Microbacterium* (рис., 4). Нами было выделено 2 вида *Enterobacter*, принадлежащих к бактериям группы кишечной палочки.

Патогенные бактерии в микрофлоре рыб были представлены тремя видами *Aeromonas*, двумя видами *Streptococcus* и двумя видами *Pseudomonas*. Бактерии *Pseudomonas diminuta* и *Aeromonas hydrophila* разжижали желатин и обладали протеолитической активностью. Бактерии *Aeromonas schubertii*, *Aeromonas caviae*, *Streptococcus agalactiae*, *Streptococcus iniae* и *Pseudomonas alcaligenes* не давали разжижение желатина, то есть не патогенны для сельди.

Мы сравнили наши результаты с опубликованными данными по микрофлоре сельди Вислинского (Калининградского) залива в 2014 г. Так, в 2014 г. было обнаружено 10 видов бактерий: *Enterococcus* – 4 вида, *Micrococcus* – 3 вида, *Bacillus* – 1 вид, *Sarcina* и *Staphylococcus* – по одному виду. Сапрофитные бактерии были представлены двумя видами: *Sarcina* и *Bacillus*. Бактерий кокковой группы было 8 видов: *Enterococcus* – 4 вида, *Micrococcus* – 3 вида и *Staphylococcus* – 1 вид. Очевидно, что наличие бактерий родов *Enterococcus* и *Staphylococcus* свидетельствует о загрязнении воды. Бактерии рода *Micrococcus* являются обычными обитателями морских вод. В микробиоценозе сельди Вислинского (Калининградского) залива 2014 г. преобладали *Enterococcus* [Березовская, Авдеева, 2019].

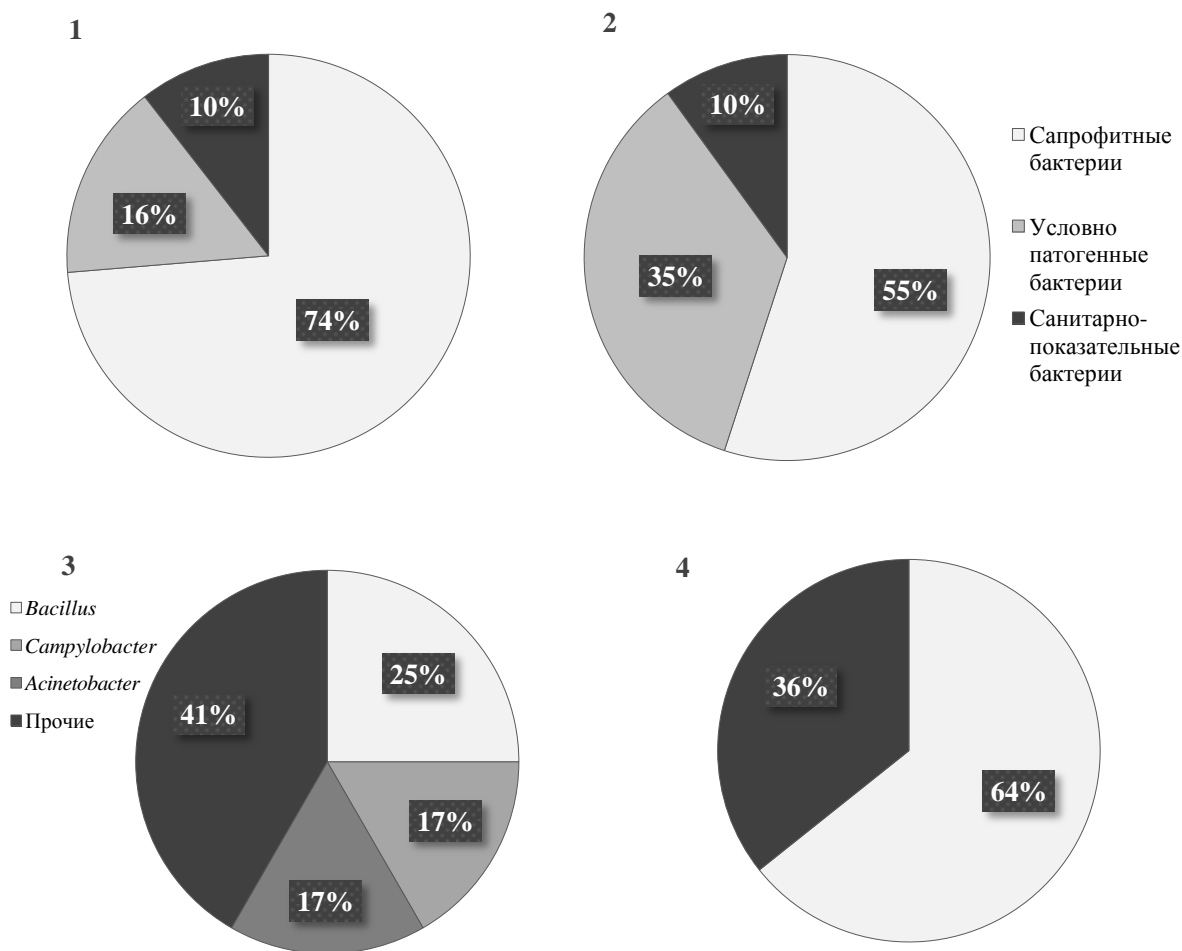


Рис. Выделенные группы бактерий и соотношение родов сапрофитных бактерий у сельди (1, 3) и шпрота (2, 4).

Fig. Different groups of bacteria and ratio of saprophytic bacterial genera isolated from the Baltic herring (1, 3) and Baltic sprat (2, 4).

Таблица 1. Виды бактерий в микрофлоре балтийской сельди, выделенные из кожи, жабр, половых продуктов и внутренних органов в период с 2022 по 2023 гг.

Table 1. Bacterial species in the microflora of Baltic herring isolated from skin, gills, reproductive products and internal organs in the period from 2022 to 2023

№	Вид	Локализация (орган)	2022	2023
<b>Сапрофитные бактерии</b>				
1	<i>Acinetobacter junii</i> Bouvet & Grimont	Половые продукты	+	-
2	<i>Acinetobacter lwoffii</i> Audureau	Жабры	-	+
3	<i>Anaerobic cocci</i> Watt	Половые продукты	-	+
4	<i>Bacillus firmus</i> Bredemann & Werner	Жабры	-	+
5	<i>Bacillus sphaericus</i> Meyer & Neide	Почки, печень	-	+
6	<i>Bacillus subtilis</i> Ehrenberg	Желудочно-кишечный тракт, печень	-	+
7	<i>Campylobacter concisus</i> Tanner et al.	Половые продукты	+	-
8	<i>Campylobacter mucosalis</i> Roop et al.	Половые продукты	+	-
9	<i>Kurthia zopfii</i> Kurth	Почки	-	+
10	<i>Listeria murrayi</i> Welshimer & Meredith	Почки	-	+
11	<i>Microbacterium lacticum</i> Orla-Jensen	Почки	-	+

Окончание табл. 1

The End of the Table 1

№	Вид	Локализация (орган)	2022	2023
<b>Патогенные бактерии</b>				
12	<i>Aeromonas caviae</i> Popoff	Сердце	-	+
13	<i>Aeromonas hydrophila</i> Stanier	Сердце	+	-
14	<i>Aeromonas schubertii</i> Hickman-Brenner et al.	Печень	+	-
15	<i>Pseudomonas alcaligenes</i> Monias	Кожа, желудочно-кишечный тракт, печень, половые продукты	-	+
16	<i>Pseudomonas diminuta</i> Leifson & Hugh	Сердце, желудочно-кишечный тракт	+	-
17	<i>Streptococcus agalactiae</i> Lehmann & Neumann	Кожа, печень	-	+
18	<i>Streptococcus iniae</i> Pier & Madin	Сердце, печень	-	+
<b>Санитарно-показательные бактерии</b>				
19	<i>Enterobacter agglomerans</i> Ewing & Fife	Кожа, печень	+	+
20	<i>Enterobacter nimipressuralis</i> Brenner et al.	Жабры, печень	+	+

Таблица 2. Виды бактерий в микрофлоре балтийского шпрота, выделенные из кожи, жабр, половых продуктов и внутренних органов в период с 2022 по 2023 гг.

Table 2. Bacterial species in the microflora of Baltic sprat isolated from skin, gills, reproductive products and internal organs in the period from 2022 to 2023.

№	Вид	Локализация (орган)	2022	2023
<b>Сапрофитные бактерии</b>				
1	<i>Acinetobacter lwoffii</i> Audureau	Жабры	+	+
2	<i>Bacillus alvei</i> Cheshire & Cheyne	Сердце	+	+
3	<i>Bacillus badius</i> Batchelor	Сердце	-	+
4	<i>Bacillus brevis</i> Migula	Половые продукты	-	+
5	<i>Bacillus coagulans</i> De Clerck	Печень	+	+
6	<i>Bacillus firmus</i> Bredemann & Werner	Печень	+	-
7	<i>Bacillus lentus</i> Gibson	Кожа	+	+
8	<i>Bacillus licheniformis</i> Chester	Почки	-	-
9	<i>Bacillus megaterium</i> de Bary	Желудочно-кишечный тракт	-	+
10	<i>Bacillus spaericus</i> Meyer & Neide	Почки	-	+
11	<i>Clostridium butyricum</i> Prazmowski	Почки	-	+
12	<i>Kurthia zopfii</i> Kurth	Почки	+	-
13	<i>Microbacterium lacticum</i> Orla-Jensen	Почки	+	-
14	<i>Veillonella caviae</i> Mays et al.	Кожа	+	-
<b>Патогенные бактерии</b>				
15	<i>Aeromonas veronii</i> Hickman-Brenner et al.	Сердце	-	+
16	<i>Corynebacterium striatum</i> Ebersson	Жабры	-	+
17	<i>Pseudomonas alcaligenes</i> Monias	Желудочно-кишечный тракт, половые продукты	+	-
<b>Санитарно-показательные бактерии</b>				
18	<i>Enterobacter agglomerans</i> Ewing & Fife	Печень	+	-
19	<i>Enterobacter nimipressuralis</i> Brenner et al.	Жабры, желудочно-кишечный тракт	+	-

В 2018 г. в микробиоценозе сельди в Вислинском (Калининградском) заливе обнаружено 23 вида бактерий: 1 вид – кишечная палочка, 3 вида *Acinetobacter*, 7 видов *Bacillus*, по 1 виду родов *Alcaligenes*, *Clostridium*, *Mycobacterium*, 6 видов

*Pseudomonas*, 2 вида *Streptococcus* и 1 вид *Veillonella*. Были выявлены бактерии группы кишечной палочки: роды *Erwinia*, *Enterobacter*, *Escherichia*. Сапрофитные бактерии представлены в основном видами, принадлежащими к роду *Bacillus*. На-

блюдалось большое разнообразие *Pseudomonas* – 7 видов. По сравнению с 2014 г. увеличилось количество условно-патогенных бактерий, что может быть связано с возросшей антропогенной нагрузкой [Березовская, Авдеева, 2019].

В 2019 г. микрофлора сельди содержала 18 видов бактерий: 5 видов *Aeromonas*, 2 вида *Pseudomonas*, 1 вид *Micrococcus*, 1 вид *Enterobacter*, 5 видов *Bacillus*, *Acinetobacter* – 2 вида, *Desulfobacter* – 1 вид, *Citrobacter* – 1 вид. Сапрофитных бактерий было обнаружено 8 видов: 5 видов *Bacillus*, 2 вида *Acinetobacter* и 1 вид *Micrococcus*. По-видимому, бактерии проникли в микрофлору рыбы из воды. Все выделенные бактерии характерны для микрофлоры рыбы и воды. Обнаружен только один вид *Enterobacter*, относящийся к бактериям группы кишечных палочек. Бактерии рода *Desulfobacter* попали в организм рыбы из воды, поскольку эти бактерии характерны для вод нефтяных месторождений. Патогенных бактерий для рыб нами было выявлено 8 видов – из них преобладали *Aeromonas* (5 видов), *Pseudomonas* были представлены двумя видами, *Citrobacter* – 1 вид [Рыков et al., 2020].

Наши исследования показали, что видовое разнообразие бактерий у сельди в 2022–2023 гг. было больше, чем в период с 2014 по 2019 гг., что, по-видимому, связано с тем, что в 2022–2023 гг. в Балтийском море наблюдалась высокая температура воды. В Вислинском (Калининградском) заливе отмечено высокое разнообразие микрофлоры, что может быть связано с высокой антропогенной нагрузкой. Полученные нами результаты свидетельствуют, что виды патогенных бактерий в микрофлоре сельди приблизительно одинаковы в период наблюдения и представлены в основном аэромонадно-псевдомонадной группой.

Видовое разнообразие бактерий у шпрота в 2022–2023 гг. приблизительно одинаково. Основу микрофлоры шпрота составляют сапрофитные бактерии, среди них преобладает *Bacillus*. Также были обнаружены санитарно-показательные бактерии *Enterobacter* (см. табл. 2).

Количество видов бактерий, обнаруженных на внутренних органах исследуемых рыб, было следующим – у сельди на коже, в жабрах, в желудочно-кишечном тракте по 3 вида, в сердце 4 вида, в почках 4 вида, в печени 8 видов, в половых продуктах 5 видов. Бактерии *Pseudomonas alcaligenes* встречались в наибольшем количестве на коже, в желудочно-кишечном тракте, печени и половых продуктах. У шпрота на коже 2 вида, в жабрах, в сердце, в печени, в желудочно-кишечном тракте по 3 вида, в почках 5 видов, в половых продуктах 2 вида. У обоих видов рыб бактерии *Pseudomonas alcaligenes* встречались в желудочно-кишечном тракте и половых продуктах, а *Enterobacter nimipressuralis* – в жабрах и желудочно-кишечном тракте. Органами с наибольшим количеством видов бактерий у сельди является печень, у шпрота – почки.

Основу микрофлоры у сельди и шпрота составляли сапрофитные бактерии. В микрофлоре этих видов рыб были выделены общие бактерии: *Bacillus firmus*, *Bacillus spaericus*, *Acinetobacter lwoffii*, *Kurthia zopfii*, *Microbacterium lacticum*, *Pseudomonas alcaligenes*, *Enterobacter agglomerans* и *Enterobacter nimipressuralis*.

Бактерии рода *Aeromonas* могут вызывать заболевания у сельди и шпрота и поражать другие важные промысловые виды рыб, а виды *A. hydrophila* и *A. veronii* могут оказывать негативное влияние и на человека. Это делает представителей сельдевых возможными переносчиками аэромонадоза. Бактерии рода *Pseudomonas* вызывают

плавниковую гниль у многих видов рыб, но очень редко поражают человека.

Наибольшее сходство микрофлоры сельди было выявлено в 2019 и 2022 гг., а наименьшее в 2014 и 2019 гг. (табл. 3). Возможными причинами такого распределения являются абиотические факторы, в основном температура воды. Индекс сходства у шпрота составил 0,364 (табл. 3). Индекс Чекановского для микрофлор сельди и шпрота составил 0,41, т. е. в целом сходство микрофлоры было низкое.

Таблица 3. Индекс Чекановского сходства микрофлоры сельди и шпрота

Table 3. Chekanovsky index for the microflora of Baltic herring and Baltic sprat

Балтийская сельдь				
Год	2014	2018	2019	2022–2023
2014	–	<b>0,06</b>	0,071	0
2018	<b>0,06</b>	–	<b>0,292</b>	0,097
2019	0,071	<b>0,292</b>	–	0,27
2022–2023	0	0,097	0,27	–
Балтийский шпрот				
Год	2023			
2022	<b>0,364</b>			

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мониторинг сельди и шпрота из юго-восточной части Балтийского моря по бактериологическим показателям будет способствовать обеспечению благополучной эпизоотической ситуации в Калининградском регионе.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### ЛИТЕРАТУРА

Авдеева Е.В. 2017а. Микрофлора рыб естественных и искусственных водоемов

Калининградской области. *Известия КГТУ*. № 4. С. 13–23.

- Авдеева Е.В. 2017б. Условно-патогенные бактерии рыб в естественных и искусственных водоемах Калининградской области. *Труды ВНИРО*. Т. 167. С. 104–109.
- Апс Р.А. 1986. Возраст и рост балтийского шпрота. Балтийское НИИ рыбного хозяйства. Рига: Авотс. 54 с.
- Березовская Н.А., Авдеева Е.В. 2019. Сравнение микрофлоры салаки (*Clupea harengus membras*) Калининградского залива, выловленной в 2014 и 2018 годах. *Colloquium-journal*. № 16. С. 6–10.
- Бирюков Н.П. 1970. Сельди Балтийского моря. Калининград: АтлантНИРО. С. 208.
- Гаевская А.В. 1986. Заболевания салаки. *Рыбное хозяйство*. № 8. С. 42.
- Гаевская А.В., Ковалева А.А. 1975. Болезни промысловых рыб Атлантического океана. Калининград: Калининградское книжное издательство. С. 124.
- Гаевская А.В., Ковалева А.А. 1991. Справочник основных болезней и паразитов промысловых рыб Атлантического океана. Калининград: АтлантНИРО. С. 208.
- Головина Н.А., Авдеева Е.В., Евдокимова Е.Б. и др. 2016. Практикум по ихтиопатологии. Учебное пособие. Москва: Моркнига. 417 с.
- Груднев М.А. 1998. Зараженность салаки (*Clupea harengus membras* (L.)) кокцидиями *Eimeria sardinae* (Sporozoa, Coccidiomorpha, Coccidiidae). Промыслово-биологические исследования АтлантНИРО в Балтийском море в 1996–1997 годах. Калининград: АтлантНИРО. С. 158–160.
- Красовская Н.В. 2022. Воспроизводство и динамика численности балтийской сельди *Clupea harengus membras* L. в Калининградском (Вислинском) заливе Балтийского моря в 1950–2010 годы. *Труды АтлантНИРО*. Т. 6. С. 84–100.

- Ларцева Л.В., Обухова О.В., Лисицкая И.А. 2008. Микрофлора рыб и других гидробионтов. Учебное пособие. Астрахань: Издательство Астраханского университета. 108 с.
- Определитель бактерий Берджи. 1997а. Под ред. Дж. Хоулта и др. Москва: Мир. Т. 1. 430 с.
- Определитель бактерий Берджи. 1997б. Под ред. Дж. Хоулта и др. Москва: Мир. Т. 2. 369 с.
- Попель И., Стшижевска К. 1971. Польские исследования сельди в Балтийском море в 1970 г. Гдыня. ПНР: Морской институт рыболовства. С. 11.
- Реймер Л.В. 1970. Миграции сельди (*Clupea harengus*) в Балтийском море. *Parasitologische Schriftenseihe*. № 5. С. 114–120.
- Труфанова И.С. 2017. Сезонное распределение российских уловов и размерно-возрастного состава балтийской сельди *Clupea harengus membras* в 26-м подрайоне ИКЕС Балтийского моря в 1992–2015 годах. *Труды АтлантНИРО. Новая серия*. Т. 1. № 3. С. 91–107.
- Czekanowski J. 1932. Coefficient of rasial likeness and durchschnittliche Differenz. *Anthropologischer Anzeiger*. Bd. 9. P. 227–249.
- Rykov N., Avdeeva E., Maltseva I. 2020. Opportunistic bacteria in the microflora of Baltic herring *Clupea harengus membras* (Linnaeus, 1761) in the Kulikovo bay of the Baltic Sea. *Österreichisches Multi-science Journal*. № 30. Vol. 2. P. 9–13.
- Avdeeva E.V. 2017a. Fish microflora in natural and artificial reservoirs of the Kaliningrad region. *Izvestiya Kaliningradskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta (Bulletin of Kaliningrad State Technical University)*. № 4. P. 13–23 (in Russian).
- Avdeeva E.V. 2017b. Opportunistic bacteria of fish in natural and artificial reservoirs of the Kaliningrad region. *Trudy VNIRO (Proceedings of VNIRO)*. Vol. 167. P. 104–109 (in Russian).
- Aps R.A. 1986. Age and growth of Baltic sprat. Baltic Research Institute of Fisheries. Riga: Avots Publ. 54 p. (in Russian).
- Berezovskaya N.A., Avdeeva E.V. 2019. Comparison of the microflora of Baltic herring (*Clupea harengus membras*) from the Kaliningrad Bay caught in 2014 and 2018. *Colloquium-journal*. № 16. P. 6–10 (in Russian).
- Biryukov N.P. 1970. Herring of the Baltic Sea. Kaliningrad: AtlantNIRO. P. 208. (in Russian).
- Gaevskaya A.V. 1986. Herring diseases. *Rybnoye khozyaystvo (Fisheries Journal)*. № 8. P. 42 (in Russian).
- Gaevskaya A.V., Kovaleva A.A. 1975. Diseases of commercial fish of the Atlantic Ocean. Kaliningrad: Kaliningrad Book Publishing House. P. 124 (in Russian).
- Gaevskaya A.V., Kovaleva A.A. 1991. Handbook of the main diseases and parasites of commercial fish of the Atlantic Ocean. Kaliningrad: AtlantNIRO. P. 208 (in Russian).
- Golovina N.A., Avdeeva E.V., Evdokimova E.B. et al. 2016. Practical training in ichthyopathology. Study guide. Moscow: Morkniga Publ. 417 p. (in Russian).
- Grudnev M.A. 1998. Infection of Baltic herring (*Clupea harengus membras* (L.)) with coccidia *Eimeria sardinae* (Sporozoa, Coccidiomorpha, Coccidiidae). Commercial biological research of AtlantNIRO in the Baltic Sea in 1996–1997. Kaliningrad: AtlantNIRO. P. 158–160 (in Russian).
- Krasovskaya N.V. 2022. Reproduction and population dynamics of Baltic herring *Clupea harengus membras* L. in the Kaliningrad (Vistula) Lagoon of the Baltic

## REFERENCES

- Sea in 1950–2010. *Trudy AtlantNIRO (Proceedings of AtlantNIRO)*. Vol. 6. P. 84–100 (in Russian).
- Lartseva L.V., Obukhova O.V., Lisitskaya I.A. 2008. Microflora of fish and other hydrobionts. Study guide. Astrakhan: Astrakhan University Publishing House. 108 p. (in Russian).
- Bergey's manual of determinative bacteriology. 1997a. Ed. J.F. Holt et al. Moscow: Mir Publ. Vol. 1. 432 p. (in Russian).
- Bergey's manual of determinative bacteriology. 1997b. Ed. J.F. Holt et al. Moscow: Mir Publ. Vol. 2. 368 p. (in Russian).
- Popiel I., Strzyzewska K. 1971. Polish herring research in the Baltic Sea in 1970. Gdynia. Poland: Marine Fisheries Institute. P. 11.
- Reimer L.V. 1970. Migrations of herring (*Clupea harengus*) in the Baltic Sea. *Parasitologische Schriftenseihe*. № 5. P. 114–120 (in Russian).
- Trufanova I.S. 2017. Seasonal distribution of Russian catches and size-age composition of Baltic herring *Clupea harengus membras* in the 26th ICES subarea of the Baltic Sea in 1992–2015. *Trudy AtlantNIRO. Novaya seriya (Proceedings of AtlantNIRO. New Series)*. Vol. 1. № 3. P. 91–107 (in Russian).
- Czekanowski J. 1932. Coefficient of racial likeness and durchschnittliche Differenz. *Anthropologischer Anzeiger*. Bd. 9. P. 227–249.
- Rykov N., Avdeeva E., Maltseva I. 2020. Opportunistic bacteria in the microflora of Baltic herring *Clupea harengus membras* (Linnaeus, 1761) in the Kulikovo bay of the Baltic Sea. *Österreichisches Multi-science Journal*. № 30. Vol. 2. P. 9–13.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Рыков Николай Андреевич** – Калининградский государственный технический университет; 236022, Россия, Калининград; аспирант кафедры «Водные биологические ресурсы и аквакультура»; rykol3@bk.ru. SPIN-код: 3206-1789, Author ID: 1304379.

**Rykov Nikolay Andreevich** – Kaliningrad State Technical University; 236022, Russia, Kaliningrad; Postgraduate Student of Aquatic Biological Resources and Aquaculture Chair; rykol3@bk.ru. SPIN-code: 3206-1789, Author ID: 1304379.

**Науменко Елена Николаевна** – Калининградский государственный технический университет; 236022, Россия, Калининград; доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры «Водные биологические ресурсы и аквакультура»; elena.naumenko@klgtu.ru. SPIN-код: 7480-0767, Author ID: 121058; Scopus ID: 26536321100; ORCID: 0009-0003-6054-2426.

**Naumenko Elena Nikolaevna** – Kaliningrad State Technical University; 236022, Russia, Kaliningrad; Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Professor of Aquatic Biological Resources and Aquaculture Chair; elena.naumenko@klgtu.ru. SPIN-code: 7480-0767, Author ID: 121058; Scopus ID: 26536321100; ORCID: 0009-0003-6054-2426.

**Авдеева Елена Витальевна** – Калининградский государственный технический университет; 236022, Россия, Калининград; кандидат биологических наук, профессор кафедры «Водные биологические ресурсы и аквакультура»; SPIN-код: 9154-9422, Author ID: 90285.

**Avdeeva Elena Vitalievna** – Kaliningrad State Technical University; 236022, Russia, Kaliningrad; Candidate of Biological Sciences, Professor of Aquatic Biological Resources and Aquaculture Chair; SPIN-code: 9154-9422, Author ID: 90285.

Статья поступила в редакцию 01.08.2025; одобрена после рецензирования 26.03.2026; статья принята к публикации 05.06.2026.

The article was submitted 01.08.2025; approved after reviewing 26.03.2026; accepted for publication 05.06.2026.

Для цитирования: Рыков Н.А., Науменко Е.Н., [Авдеева Е.В.](#) 2026. Микрофлора сельди и шпрота из юго-восточной части Балтийского моря. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. Вып. 76. С. 73–83. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2026-76-73-83>.

For citation: Rykov N.A., Naumenko E.N., [Avdeeva E.V.](#) 2026. Microflora of herring and sprattus from the southeast part of the Baltic Sea. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta (Bulletin of Kamchatka State Technical University)*. Iss. 76. P. 73–83 (in Russian). <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2026-76-73-83>.

Краткое сообщение

УДК 574.583 (265.54)

DOI: 10.17217/2079-0333-2026-76-84-90

**МОРФОЛОГИЯ ЛИЧИНОК ВТОРОЙ СТАДИИ КРЕВЕТКИ  
*SPIRONTOCARIS SPINUS* (DECAPODA, THORIDAE) ИЗ КРОНОЦКОГО ЗАЛИВА  
(СЕВЕРО-ЗАПАДНАЯ ЧАСТЬ ТИХОГО ОКЕАНА)**

Седова Н.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Камчатский государственный технический университет, Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35.

<sup>2</sup> Камчатский филиал Тихоокеанского института географии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, ул. Партизанская, 6.

В статье дано описание личинок второй стадии, отнесенных к виду *Spirontocaris spinus* (семейство Thoridae) из планктонных проб, собранных в северо-западной части Тихого океана (Кроноцкий залив). Выявлены отличия личинок из северо-западной части Тихого океана от личинок из Атлантического океана. Выделены две морфологические формы, отличающиеся, главным образом, степенью развития плеоподов и антеннул. Асимметрия строения выявлена для антеровентрального края карапакса, вооружения экзоподита первой максиллипеды, базального эндита максиллулы, вооружения экзоподита антеннулы, скафогнатита и скафоцерита, длины шипа скафоцерита.

**Ключевые слова:** личинки, северо-западная часть Тихого океана, стадия, форма, *Spirontocaris spinus*.

Research note

**MORPHOLOGY OF SECOND-STAGE SHRIMP LARVA OF *SPIRONTOCARIS SPINUS*  
(DECAPODA, THORIDAE) FROM KRONOTSKY GULF (NORTHWESTERN PACIFIC)**

Sedova N.A.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Klyuchevskaya Str. 35.

<sup>2</sup> Kamchatka Branch of Pacific Geographical Institute FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Partizanskaya Str. 6.

The article describes the larvae of the second stage, which belong to the species *Spirontocaris spinus* (family Thoridae), from plankton samples collected in the northwestern Pacific Ocean (Kronotsky Bay). The larvae from the northwestern Pacific differ from those from the Atlantic. Two morphological forms have been identified, which differ mainly in the degree of development of the pleopods and antennae. The asymmetry of the structure is revealed for the anteroventral margin of the carapace, the armament of the exopodite of the first maxilliped, the basal endite of the maxilla, the armament of the exopod of the antennula, the scaphognathite and the scaphocerite, and the length of the scaphocerite spine.

**Key words:** larvae, northwestern Pacific, stage, form, *Spirontocaris spinus*.

Спиронтокарис колючий *Spirontocaris spinus* (Sowerby, 1805) – широко распространенный во многих морях Тихого и Атлантического океанов вид креветок из семейства Thoridae. Взрослые особи обитают на каменистых грунтах на глубинах от 16 до 400 м. Вид является малочисленным и не образует промысловых скоплений. Максимальная длина тела взрослых креветок *S. spinus* – 60 мм [Слизкин, 2006].

За 20-летний период исследований в прикамчатских водах личинки колючего спиронтокариса были обнаружены всего один раз на трех станциях. Наиболее вероятной причиной столь редкого явления могут быть следующие обстоятельства. Во-первых, обычно планктонную съемку в Кроноцком заливе в первой половине мая не проводят. Судно проходит в подобных рейсах с севера на юг, поэтому в Кроноцком заливе оно обычно оказывается не позднее второй половины апреля. В более холодные годы (до 2017 г.) вылупление большей части видов рода *Spirontocaris* происходило, вероятно, в более поздние сроки [Седова, 2019]. Во-вторых, численность взрослых особей данного вида вряд ли высока в данном районе. Возможно, *S. spinus* здесь встречается крайне редко. Публикации о поимке спиронтокариса колючего в прикамчатских водах отсутствуют.

Личинки *S. spinus* из тихоокеанских вод до сих пор не описаны. Имеется лишь подробное описание пяти личиночных стадий этого вида из атлантических вод Канады [Squires, 1993]. Цель данной работы – описать особенности морфологии имеющихся стадий развития и сравнить их с личинками из Атлантического океана.

Материалом для исследования послужил планктон, собранный сотрудниками Камчатского отделения ВНИРО в Тихом океане у юго-восточного побережья Камчатки в апреле – мае 2017 г. Ихтиопланк-

тонные конические сети с входным диаметром 80 см и размером ячеей 0,56 мм использовали на глубинах от 9 до 3 000 м. Съемку проводили по направлению с севера на юг. Личинки этого вида встречены 1 и 2 мая у восточного побережья Камчатки в Кроноцком заливе на трех станциях с глубиной от 137 до 415 м. Наибольшая плотность личинок 8 экз/м<sup>2</sup> отмечена на глубине 397 м (рис. 1). При описании общей морфологии отдельных стадий пользовались адаптированной к креветкам схемой, предложенной Кларком с соавторами [Clark et al., 1998]. Для описания типа и вооружения щетинок использовали классификацию Гарма [Garm, 2004]. Сроки выхода в планктон и продолжительность развития личинок определяли по оригинальной методике, разработанной ранее для личинок каридных креветок [Седова, 2019].

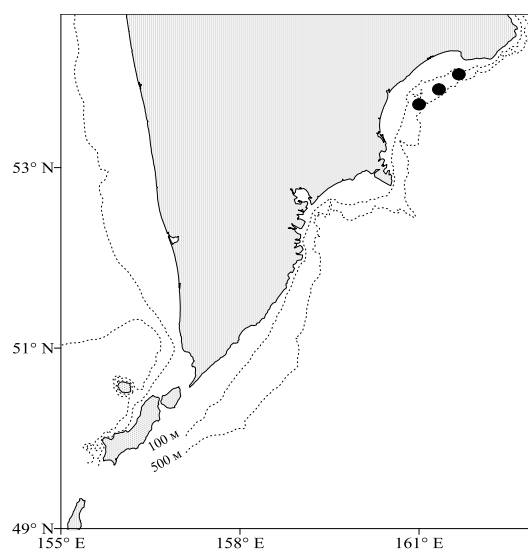


Рис. 1. Места поимки *Spirontocaris spinus* вблизи юго-восточного побережья Камчатки в мае 2017 г.

Fig. 1. Locations where *Spirontocaris spinus* was captured near the southeastern coast of Kamchatka in May 2017

Была обнаружена только II стадия зоеа *S. spinus*. Выделены две формы, отличающиеся, главным образом, степенью разви-

тия плеоподов. Общая длина личинок 6,0–7,0 мм, длина карапакса 1,2–1,7 мм, длина роострума 0,8–0,9 мм.

### Форма 1

Рострум очень длинный и тонкий, глаза цилиндрические, подвижные. Надглазничные шипы крупные, острые. Птеригостомиальный шип небольшой, антеровентральный край карапакса вооружен с одной стороны двумя, с другой стороны тремя хорошо заметными шипиками (рис. 2, *GV*).

Основание антеннулы 2-сегментное. Первый сегмент несет четыре простые короткие наружные латеральные щетинки, одну перистую внутреннюю длинную щетинку, шип на вентральной стороне и одну перистую внутренне-терминальную длинную щетинку и пучок коротких терминальных простых щетинок. Второй сегмент вооружен одной длинной перистой внутренне-терминальной щетинкой. Эндоподит антеннулы в 1,5 раза короче дистального сегмента, несет одну перистую апикальную щетинку; экзоподит несет три эстетаска и две простые щетинки (рис. 2, *A1*).

Основание антенны 2-сегментное, с тонким терминальным шипом на базиподите. Экзоподит антенны несегментированный, чуть длиннее скафоцерита, с тонким шипом и короткой простой щетинкой на конце. Основание жгутика не отделено. Скафоцерит с двумя узкими дистальными члениками, 19–20 перистыми щетинками на внутренне-терминальном крае (рис. 2, *A2*). Шип скафоцерита очень длинный.

Коксальный эндит максиллулы вооружен семью колючими терминальными и двумя перистыми латеральными щетинками, базиальный эндит несет 14 терминальных щетинок на левой конечности и 15 щетинок различного строения – на правой; на эндоподите имеются пять щетинок

и короткий шипик. Максилла имеет типичное для данного рода и стадии строение. Скафогнатит с 13 перистыми щетинками.

Коксоподит первого максиллипеда с крупным эпиподитом, экзоподиты первой пары ногочелюстей вооружены четырьмя перистыми щетинками на одной конечности и пятью щетинками на второй. На экзоподите второго максиллипеда 12 перистых щетинок, эпиподит отсутствует. На экзоподите третьего максиллипеда 14 длинных перистых щетинок.

Переоподы в виде длинных несегментированных зачатков. Экзоподиты первой и второй пар переоподов лишены плавательных щетинок. Зачатки клешней имеются на первой и второй парах переоподов. Третья – пятая пары одноветвистые.

Длинные и тонкие дорзолатеральные шипы имеются на четвертом и пятом абдоминальных сегментах (рис. 2, *GV*). Уроподы отсутствуют. Первая пара плеопод отсутствует, вторая – пятая пары плеопод в виде длинных раздвоенных бугорков (рис. 2, *pl*). Тельсон нечетко отделен от анального сомита, с маленькой выемкой на терминальном крае. На тельсоне восемь пар терминальных перистых щетинок (рис. 2, *T*).

### Форма 2

Рострум очень длинный и тонкий, супраорбитальные шипы крупные. Глаза как у формы 1. Птеригостомиальный шип тонкий и длинный (рис. 3, *GV*, *Sp*). Антеровентральный край карапакса вооружен тремя шипиками с одной стороны и четырьмя шипиками с другой стороны.

Основание антеннулы как у формы 1. Экзоподит антеннулы двучлениковый, первый членик вооружен двумя простыми терминальными щетинками, второй членик несет 3–4 эстетаска и 1–2 простые сенсорные щетинки; эндоподит в два раза ко-

роче экзоподита, состоит из двух члеников и несет одну перистую апикальную щетинку (рис. 3, A1).

Основание антенны как у формы 1. Шип и щетинка на конце жгутика в 2–3 раза длиннее, чем у формы 1. Эндоподит по длине примерно равен экзоподиту либо длиннее. Основание жгутика отделено, у одной личинки имеется сегментация только на одной из антенн. Скафоцерит несет 18–20 перистых щетинок на внутренне-терминальном крае, конец скафоцерита с тремя дистальными члениками, шип скафоцерита заходит за край пластины на 1/2–1/3 своей длины (рис. 3, A2).

Коксальный эндит максиллулы как у формы 1. На базиальном эндите 14 либо 15 щетинок различного строения на обеих конечностях. Эндоподит без изменений.

Экзоподит максиллы несет 13–14 щетинок. Морфология коксального эндита и эндоподита максиллы как у формы 1. У большинства особей на правом и левом скафоцерите количество щетинок различается.

На экзоподите второй пары максиллипед 13 перистых щетинок, эпиподит отсутствует. На экзоподите третьей пары 14–15 длинных перистых щетинок. Первая пара плеопод в виде простых бугорков, вторая – пятая пары плеопод в виде длинных раздвоенных бугорков (рис. 3, pl). Морфология тельсона, первой пары максиллипед и переподов не отличается от таковой формы 1. Тельсон отделен от анального сегмента, анальный шип очень маленький, едва заметный (рис. 3, T). Дорзолатеральные шипы на 4-м и 5-м абдоминальных сегментах тонкие, короткие.

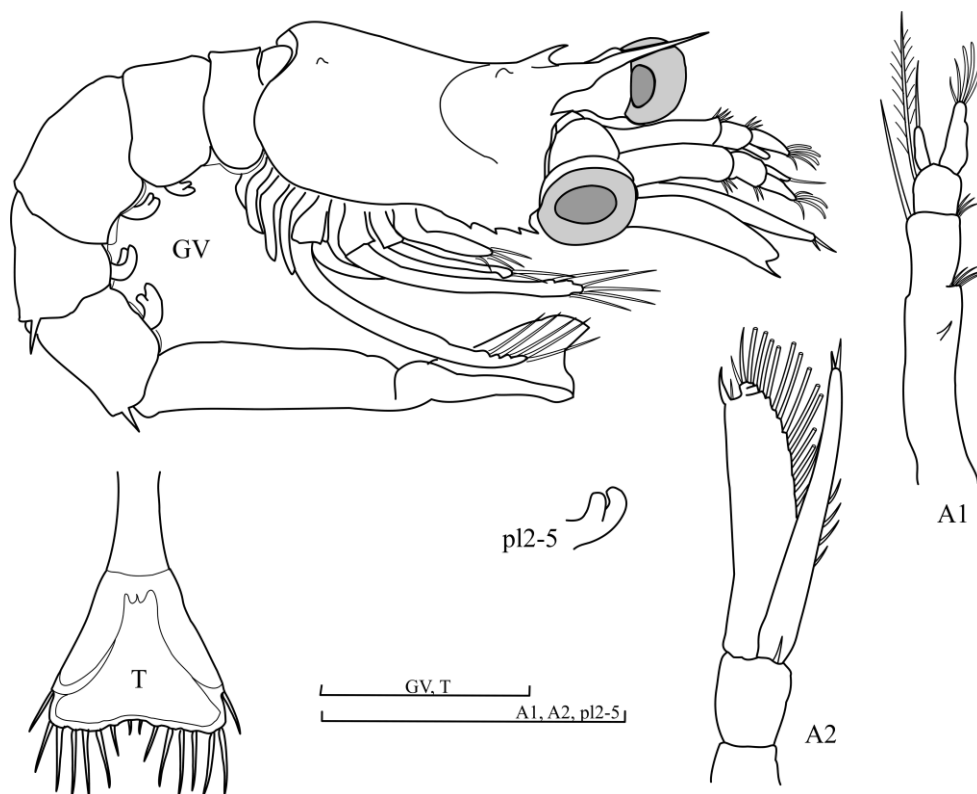


Рис. 2. Морфология зоа II *Spirontocaris spinus*, форма 1. Масштаб 1 мм

Fig. 2. Morphology of Zoea II *Spirontocaris spinus*, form 1. Scale 1 mm

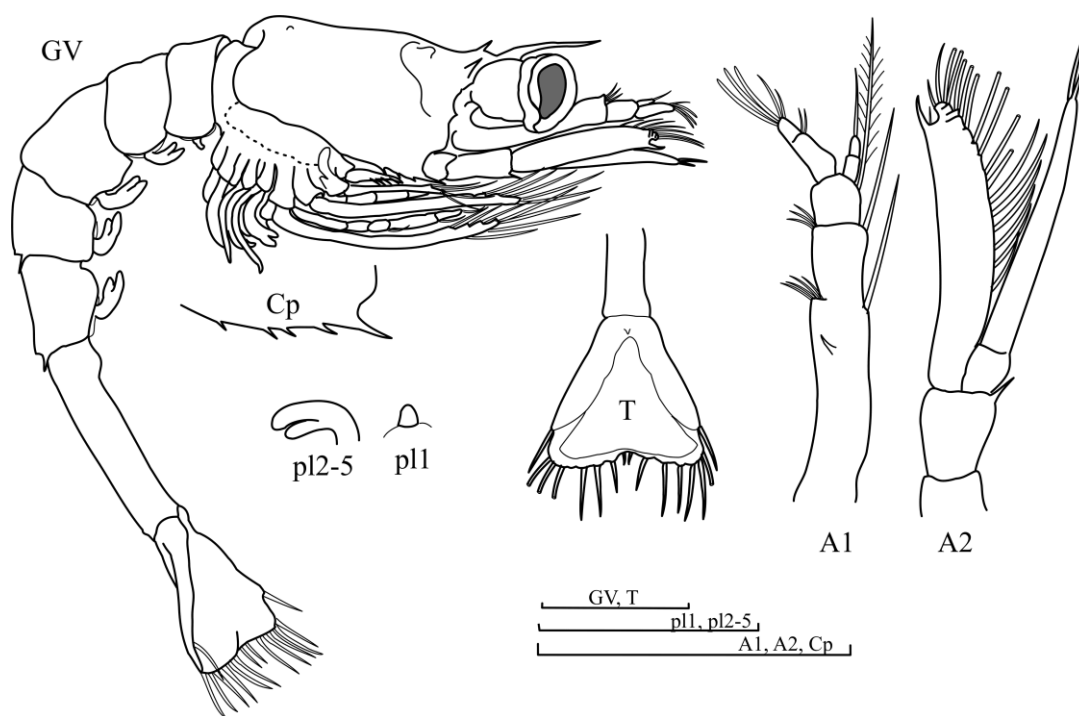


Рис. 3. Морфология зоеа II *Spirontocaris spinus*, форма 2. Масштаб 1 мм

Fig. 3. Morphology of Zoea II *Spirontocaris spinus*, form 2. Scale 1 mm

Форма 1 отличается от формы 2 рядом признаков:

- количество антеровентральных шипиков несколько больше у формы 2;
- плеоподы лучше развиты у формы 2 (уже имеется первая пара);
- шипы на 4-м и 5-м абдоминальных сегментах у формы 2 более короткие;
- у формы 2 имеется более длинный птеригостомиальный шип;
- антеннулы лучше развиты у формы 2 – ветви данной конечности двучлениковые;
- форма 2 имеет три отделенных дистальных членика, форма 1 – только два;
- жгутик антенны у формы 2 несет более длинную апикальную щетинку;
- основание жгутика антенны у формы 1 еще не отделилось, в отличие от формы 2.

Отделение тельсона от анального сомита может несколько запаздывать у отдельных особей. Антеннула – одна из наи-

более изменчивых конечностей спиронтокарисов. Различия касаются лишь отдельных морфологических форм. Форма 1 и форма 2 у *S. spinus* различается по степени расчленения ветвей антеннулы. Аналогично различаются морфологические формы *Spirontocaris murdochi*, *S. ochotensis* и *S. arcuata*. Некоторая индивидуальная изменчивость выявлена также для антенн. Количество отделенных члеников на конце скафоцерита варьирует незначительно.

Асимметрия строения выявлена для антеровентрального края карапакса, вооружения экзоподита, первой максиллипеды, базального эндита максиллулы, вооружения экзоподита антеннулы, скафогнатита и скафоцерита, длины шипа скафоцерита. Данные отклонения являются нормой для рода *Spirontocaris* [Седова, 2020].

Зоеа формы 2 из наших вод по морфологии ближе к атлантическим личинкам, но имеются некоторые расхождения. Выделенные формы колючего спиронтокари-

са несколько отличаются от личинок *S. spinus* из атлантических вод чуть большей длиной, меньшим количеством антеровентральных шипиков, степенью развития плеоподов, степенью развития и вооружением антеннулы, более развитым жгутиком антенны, более длинным шипом скафоцерита, большим количеством щетинок на скафогнатите, более короткими апикальными шипами и щетинками у жгутика антенны, несегментированными переоподами. Вышеперечисленные различия являются малосущественными.

Сквайрс [Squires, 1993] приводит описание четырех стадий зоза и декаподитной стадии. К сожалению, автор не указал количество шипов на базальном эндите максиллулы. Данный признак является одним из наиболее значимых. Декаподит из Атлантического океана по морфологии явно соответствует шестой стадии развития, поскольку у него имеется 6-члениковый экзоподит и 5-члениковый эндоподит антеннулы и ряд других мелких признаков. О том, что четвертая описанная стадия не является последней стадией зоза, свидетельствует и недостаточное развитие плеоподов (в частности, первые плеоподы в виде бугорков, а у декаподита они ветвистые со щетинками), короткие ветви антеннулы.

Поскольку в 2017 г. вторая стадия зоза *S. spinus* была поймана в начале мая, можно предположить, что личинки спирантокариса колючего появляются в планктоне Кроноцкого залива в середине апреля. Расчеты показывают, что эти личинки должны были развиваться до конца июня. Возможно, некоторые особи задерживаются в планктоне до середины июля в более холодные годы.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Седова Н.А. 2019. Морфология и экология личинок каридных креветок морских вод Камчатки и Чукотки. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ. 180 с.
- Седова Н.А. 2020. Особенности личиночного развития креветок рода *Spirontocaris* (Decapoda, Thoridae) из северо-западной части Тихого океана. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. Вып. 51. С. 73–82.
- Слизкин А.Г. 2006. Атлас-определитель крабов и креветок дальневосточных морей России. Владивосток: ТИНРО-центр. 216 с.
- Clark P.F., Calazans D.K., Pohle G.W. 1998. Accuracy and standardization of brachyuran larval descriptions. *Invertebrate Reproduction and Development*. Vol. 33. P. 127–144. <http://dx.doi.org/10.1080/07924259.1998.9652627>
- Garm A. 2004. Revising the definition of the crustacean seta and setal classification systems based on examinations of the mouthpart setae of seven species of decapods. *Zoological Journal of the Linnean Society*. Vol. 142. P. 233–252.
- Squires H.J. 1993. Decapod crustacean larvae from Ungava Bay. *Journal of Northwest Atlantic Fishery Science*. Vol. 10. P. 1–168.

#### REFERENCES

- Sedova N.A. 2019. Morphology and ecology of caridean shrimp larvae of sea waters of Kamchatka and Chukotka. Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatka State Technical University. 180 p. (in Russian).
- Sedova N.A. 2020. Features of larval development of shrimps of genus *Spirontocaris* (Decapoda, Thoridae) in the Northeastern

- Pacific. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta (Bulletin of Kamchatka State Technical University)*. Iss. 51. P. 73–82 (in Russian).
- Slizkin A.G. 2006. Atlas-determinant of crabs and shrimps of the Far Eastern seas of Russia. Vladivostok: TINRO-centr. 216 p. (in Russian).
- Clark P.F., Calazans D.K., Pohle G.W. 1998. Accuracy and standardization of brachyuran larval descriptions. *Invertebrate Reproduction and Development*. Vol. 33. P. 127–144. <http://dx.doi.org/10.1080/07924259.1998.9652627>
- Garm A. 2004. Revising the definition of the crustacean seta and setal classification systems based on examinations of the mouthpart setae of seven species of decapods. *Zoological Journal of the Linnean Society*. Vol. 142. P. 233–252.
- Squires H.J. 1993. Decapod crustacean larvae from Ungava Bay. *Journal of Northwest Atlantic Fishery Science*. Vol. 10. P. 1–168.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Седова Нина Анатольевна** – Камчатский государственный технический университет; 683003, Россия, Петропавловск-Камчатский; доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры водных биоресурсов, рыболовства и аквакультуры; Камчатский филиал Тихоокеанского института географии ДВО РАН; 683000, Россия, Петропавловск-Камчатский; ведущий научный сотрудник лаборатории гидробиологии. [sedova67@bk.ru](mailto:sedova67@bk.ru). SPIN-код: 5638-3959, Author ID: 664456; Scopus ID: 7003300397; Researcher ID: ABH-5014-2020; ORCID: 0000-0002-0137-9628.

**Sedova Nina Anatolievna** – Kamchatka State Technical University; 683003, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Doctor of Biological Sciences, Docent, Professor of Water Bioresources, Fishery and Aquaculture Chair; Kamchatka Branch of Pacific Geographical Institute FEB RAS; 683000, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Leading Researcher of Laboratory of Hydrobiology. [sedova67@bk.ru](mailto:sedova67@bk.ru). SPIN-code: 5638-3959, Author ID: 664456; Scopus ID: 7003300397; Researcher ID: ABH-5014-2020; ORCID: 0000-0002-0137-9628.

Статья поступила в редакцию 28.02.2026; одобрена после рецензирования 08.06.2026; статья принята к публикации 11.06.2026.

The article was submitted 28.02.2026; approved after reviewing 08.06.2026; accepted for publication 11.06.2026.

Для цитирования: Седова Н.А. 2026. Морфология личинок второй стадии креветки *Spirontocaris spinus* (Decapoda, Thoridae) из Кроноцкого залива (северо-западная часть Тихого океана). *Вестник Камчатского государственного технического университета*. Вып. 76. С. 84–90. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2026-76-84-90>.

For citation: Sedova N.A. 2026. Morphology of second-stage shrimp larva of *Spirontocaris spinus* (Decapoda, Thoridae) from Kronotsky Gulf (northwestern Pacific). *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta (Bulletin of Kamchatka State Technical University)*. Iss. 76. P. 84–90 (in Russian). <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2026-76-84-90>.

Научная статья

УДК 579.64+579.266+57.044

DOI: 10.17217/2079-0333-2026-76-91-110

**АКТУАЛИЗАЦИЯ СПИСКА ВИДОВ ПРЕСНОВОДНЫХ  
И ПОЧВЕННЫХ ВОДОРОСЛЕЙ КАМЧАТКИ А.А. ЕЛЕНКИНА, 1914  
В СООТВЕТСТВИИ С СОВРЕМЕННЫМИ ДАННЫМИ**

Клочкова Т.А., Васильев М.В., Питиримов Н.Д.

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

В статье приводится актуализированный список 349 видов пресноводных и почвенных водорослей Камчатки, составленный по монографии А.А. Еленкина [Еленкин, 1914]. Наиболее многочисленными по видовому составу являются диатомовые, сине-зеленые, конъюгатные и зеленые водоросли (по 121, 86, 76, 50 видов соответственно). В исследованных нами вулканических пепловых почвах Центральной Камчатки практически всегда преобладали сине-зеленые водоросли, второе по численности место занимали зеленые. В исследованных почвах сельскохозяйственных полей Юго-Восточной Камчатки по количественному и качественному (т. е. видовому) составу преобладали зеленые водоросли, включая многоклеточные нитчатые талломы и одноклеточные виды. В целом альгоценозы всех исследованных камчатских почв можно охарактеризовать как относительно бедные по видовому составу. Также в нашей работе впервые для Камчатки поднят вопрос исследований инвазивных видов высших растений и их способности менять профиль местных почв. Наши исследования показали, что в почве под инвазивным видом *Lupinus polyphyllus* (Люпин многолистный) видовое разнообразие цианобактерий в 2–3 раза превышало среднее количество их представителей в почвах, не заселенных люпинами. Природные территории Камчатки ежегодно посещают тысячи туристов со всех частей света. Это повышает риск инвазии камчатских экосистем почвенными микроорганизмами, поскольку последние чрезвычайно устойчивы и могут быть занесены на новые территории.

**Ключевые слова:** альгоценозы, инвазивные виды, Камчатка, почвенные и пресноводные водоросли, продуктивность почв, список видов, цианобактерии.

Original article

**UPDATING THE CHECKLIST BY A.A. ELENKIN (1914) OF FRESHWATER  
AND SOIL ALGAL SPECIES FROM KAMCHATKA IN ACCORDANCE  
WITH MODERN DATA**

Klochkova T.A., Vasilev M.V., Pitirimov N.D.

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

In this paper, we present an updated list of 349 species of freshwater and soil algae from Kamchatka, composed based on the monograph by A.A. Elenkin [Elenkin, 1914]. The most numerous in terms of species composition are diatoms, blue-green, conjugate, and green algae (121, 86, 76, and 50 species, respectively). In the volcanic ash soils from central Kamchatka, blue-green algae almost always predominated, with green algae occupying the second place in abundance. In the studied soils of agricultural fields in southeastern Kamchatka, green algae predominated in terms of quantitative and qualitative species composition, including

multicellular filamentous thalli and unicellular species. In general, the algal cenoses of all soils from Kamchatka that we investigated can be characterized by a relatively poor species composition. In our paper, we also provide data related to the study of invasive higher plant species and their ability to alter local soil profiles in Kamchatka for the first time. Our research showed that in soils occupied by the invasive species *Lupinus polyphyllus*, cyanobacterial species diversity was 2–3 times higher than the average abundance of cyanobacteria in soils not colonized by lupines. Thousands of tourists from all over the world visit Kamchatka's natural areas every year. This increases the risk of invasion of Kamchatka's ecosystems by soil microorganisms, since they are extremely resistant and can be introduced into new territories.

**Key words:** algal cenoses, invasive species, Kamchatka, soil and freshwater algae, soil productivity, list of species, cyanobacteria.

## ВВЕДЕНИЕ

Присутствие в почве различных микроорганизмов является важным фактором процесса ее образования и незаменимым звеном биогеохимических циклов. По количественному и качественному составу микроорганизмов возможно определить способность почвы поддерживать свою биологическую продуктивность [Клочкова, Ермакова, 2020]. Для разных географических районов и типов почв характерны свои уникальные сообщества микроорганизмов. В монографии одних из наиболее известных отечественных исследователей в области почвенной альгологии М.М. Голлербаха и Э.А. Штины сказано, что в почвах СССР насчитывалось 1 218 видов водорослей, включая 403 вида цианобактерий, 373 – зеленых, 120 – желто-зеленых, 298 – диатомовых, 16 – эвгленовых, 4 – золотистых и 4 – пировитовых (группа, объединявшая динофлагеллят и криптоноад) [Штина, Голлербах, 1976]. Эти цифры косвенно указывают на то, что практически в любых регионах наиболее многочисленными почвенными микроорганизмами являются цианобактерии, зеленые и диатомовые водоросли. Из литературных источников известно, что многие их виды являются крайне устойчивыми к различным биотическим и абиотическим факторам [DeNicola, 2000; Klochkova et al., 2006].

Региональные видовые списки пополняются практически с каждой новой опубликованной работой [Аллагуватова и др., 2021; Сущенко, Багмет, 2024], при этом в настоящее время не существует сводной работы по общему количеству видов почвенных и пресноводных водорослей России. Для Камчатки проблема отсутствия сводного списка почвенных и пресноводных водорослей также актуальна.

По сравнению с морской альгологией [Клочкова и др., 2023, 2025а, 2025в], исследования в области альгологии почв и пресных водоемов на Камчатке имеют скорее эпизодический, чем регулярный характер. По нашему мнению, наиболее подробный список с описанием пресноводных и почвенных водорослей региона приводится в монографии, опубликованной в начале XX в. А.А. Еленкиным [Еленкин, 1914]. Только через 40 лет исследования продолжил С.И. Кузнецов (1955 г.), а в последующие годы – Г.А. Заварзин, М.В. Иванов, Л.М. Герасименко [Ефимова, 2005]. Основным направлением исследований этих ученых являлось изучение морфологии и биологии развития цианобактерий гидротерм Камчатки. Позже исследования в области экологии и геохимической деятельности микроорганизмов на активных вулканах и в гидротермах продолжила Т.Г. Кузякина [Кузякина, 2000]. В последние годы было опубликовано несколько статей по микро-

водорослям почв и пирокластических отложений вулканов Камчатки [Аллагуватова и др. 2021, 2022; Сущенко, Багмет, 2024; Abdullin, 2013; Abdullin et al., 2022; Gontcharov et al., 2025].

Целью настоящей работы является актуализация списка видов пресноводных и почвенных водорослей Камчатки А.А. Еленкина [Еленкин, 1914] в соответствии с современными данными. Дополнительно было проведено определение численности видов почвенных и пресноводных водорослей в почвах разного типа (природных, антропогенных) из некоторых районов Камчатского края (г. Петропавловск-Камчатский, Елизовский и Усть-Камчатский муниципальные районы). Ниже приводятся полученные нами результаты.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При проведении таксономической ревизии списка видов пресноводных и почвенных водорослей Камчатки за основу был взят список, составленный нами по монографии А.А. Еленкина [Еленкин, 1914]. Номенклатурные изменения названий видов сверяли с электронной базой данных AlgaeBase [Guiry, Guiry, 2026] и другими литературными источниками.

Пробы почвы собирали в Камчатском крае на территории Усть-Камчатского округа и Елизовского района, а также в городском округе Петропавловска-Камчатского в стерильные zip-lock пакеты, затем маркировали и транспортировали в лабораторию. При выборе районов исследования выбирали природные местообитания, которые не являлись местами массового турпотока. Также было проведено исследование городских (т. е. антропогенных) и сельскохозяйственных почв.

Для того чтобы в лабораторной культуре в чашках Петри развились почвенные ор-

ганизмы, образцы почвы помещали в жидкую пресную среду. Для подготовки такой среды использовали природную воду из скважины, разлитую на камчатском источнике («Малки», бутилированная негазированная). В воду добавляли растворы витаминов и микроэлементов, приготовленные по прописи, представленной в нашей ранней работе [Klochkova et al., 2006]. Обычно клетки выходили из анабиоза и начинали размножение и/или рост по прошествии нескольких месяцев (от 1,5 до 3 мес). Иногда это занимало более длительное время.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### *Актуализация списка видов пресноводных и почвенных водорослей Камчатки*

Когда с внедрением в альгологию методов молекулярной генетики началось развитие генотипической систематики [Клочкова и др., 2025a], в систематике пресноводных и почвенных водорослей произошли существенные изменения. При проведении таксономической ревизии списка видов пресноводных и почвенных водорослей Камчатки за основу был взят список, составленный нами по монографии А.А. Еленкина [Еленкин, 1914]. Мы считаем, что вплоть до настоящего времени список видов по А.А. Еленкину является наиболее полным для флоры пресноводных и почвенных видов Камчатки. Дополнительно в список диатомовых были внесены виды, указанные в статье Р.З. Сущенко и В.Б. Багмет [Сущенко, Багмет, 2024], поскольку эти авторы привели сканирующие электронные микрофотографии диатомей, что делает идентификацию их находок весьма наглядной, даже в случаях когда вид был определен только до рода (т. е. *sp.*).

Новые для флоры виды, указанные в статьях авторов Аллагуватова и др. [Ал-

лагуватова и др. 2021; 2022], не включены в наш список, поскольку их микрофотографии в статьях не приводятся. Также в статьях сказано, что для определения видов эти авторы проводили выделение ДНК и ПЦР-анализ, однако регистрационных номеров сиквенсов в статьях нет [NCBI, 2026]. По нашему мнению, вводить новые и редкие виды во флору региона, а в ряде случаев они оказались новыми в целом для России, списком без микрофотографий, описания и сиквенсов не является достаточно обоснованным. Например, на момент поиска от 01.12.2025 г. в NCBI было зарегистрировано более 218 тыс. сиквенсов *Chlorella* [NCBI, 2026], и найти из них отдельный, который относится в новому для флоры Камчатки виду *Chlorella* sp., указанному в статьях [Аллагуватова и др., 2021; Abdullin et al., 2022], не представляется возможным. Это касается и других видов.

Новые для флоры Камчатки виды зеленых водорослей, *Eremochloris kamchatica* [Abdullin et al., 2022] и *Chlorolilaea mutnoviae* [Gontcharov et al., 2025], обнаруженные в грунте с вулканов Шивелуча и Мутновского, мы внесли в список, поскольку их сиквенсы зарегистрированы и находятся в свободном доступе в NCBI (MW396942–44, RQ594179) [NCBI, 2026].

Нами был составлен список видов пресноводных и почвенных водорослей полуострова Камчатка с учетом современных номенклатурных изменений и новых находок, в том числе наших собственных. Виды приводятся в алфавитном порядке, распределены по группам водорослей.

В списке приводятся все виды пресноводных, почвенных и термофильных водорослей Камчатки, представленных в монографии А.А. Еленкина [Еленкин, 1914], которые он посчитал валидными для флоры региона. Мы также включили собственные данные, полученные за период с 2018 г. по

2026 г. Кроме дублирующихся (т. е. в настоящее время объединенных в синонимы) и сомнительных видов, мы также исключили из списка флоры Камчатки вид *Haematococcus lacustris* по следующей причине. В разделе «Дополнение» на стр. 397 монографии А.А. Еленкина [Еленкин, 1914] сказано следующее: «*Haematococcus pluviialis* Flot. [= *H. lacustris*] – организм, вызывающий явление так называемой “кровавой воды”. Водоросль эта была собрана В.И. Савичем в покоем состоянии на камнях вместе с подводными лишайниками в горных речках».

Однако определить родовую принадлежность видов *Haematococcus* только по цистам не представляется возможным, поскольку ключевую роль в их определении играет специфическая морфология подвижных жгутиковых клеток [Kim et al., 2011]. По нашим наблюдениям, цисты *Haematococcus* не имеют устойчивых признаков, отличающих их от цист других каротиногенных видов (рис. 1), которые мы также собирали.

Другие, включая многоклеточные, виды также переживают неблагоприятные условия среды, формируя красные одноклеточные цисты. Например, обнаруженный нами в почвах и на коре деревьев вид *Trentepohlia* sp. находился в стадии покоящихся ярко-красных клеток с очень толстыми клеточными стенками. При культивировании в пресной воде через несколько месяцев развивались нитчатые разветвленные микрокустики зеленого цвета.

Таким образом, в своих исследованиях мы не находили подвижных клеток *H. pluviialis* [= *H. lacustris*] в природе, а также при культивировании собранных образцов камчатских каротиногенных микроводорослей. Суровые природные условия Камчатки не представляют собой типичное местообитание для успешного размножения данного вида, кроме того, обычно он не обитает в горных речках.

Как показывают наши исследования, на Камчатке повсеместно распространен другой каротиногенный вид – *Chlamydomonas nivalis*. Данный вид является космополитом. Чаще всего он встречался в виде разноразмерных покоящихся клеток пурпурно-красного цвета. В почве и на снегу

часто находился в виде толстостенных покоящихся цист с буграми на поверхности или ровной поверхностью (рис. 2). При культивировании в жидкой пресной среде появлялась новая генерация подвижных жгутиков клеток с морфологией, типичной для *C. nivalis*.

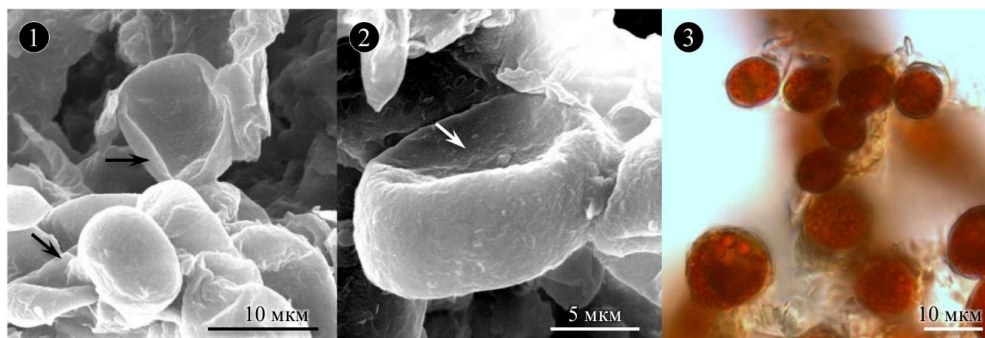


Рис. 1. Микрофотографии зеленой нитчатой почвенной микроводоросли *Trentepohlia* sp.: 1–2 – цисты из образцов почвы под сканирующим электронным микроскопом. Многие клетки высохли настолько сильно, что стали сжатыми (показаны стрелками). При этом они оставались жизнеспособными; 3 – цисты из образцов почвы под световым микроскопом. Клетки содержали крупные липидные капли (запасающие каротиноиды, возможно, астаксантин)

Fig. 1. Micrographs of the green filamentous soil microalga *Trentepohlia* sp.: 1–2 – cysts from soil samples viewed under a scanning electron microscope. Many cells were so dry that they became compressed (shown by arrows). However, they remained capable of becoming alive; 3 – cysts from soil samples viewed under a light microscope. The cells contained large lipid droplets (storing carotenoids, possibly astaxanthin)

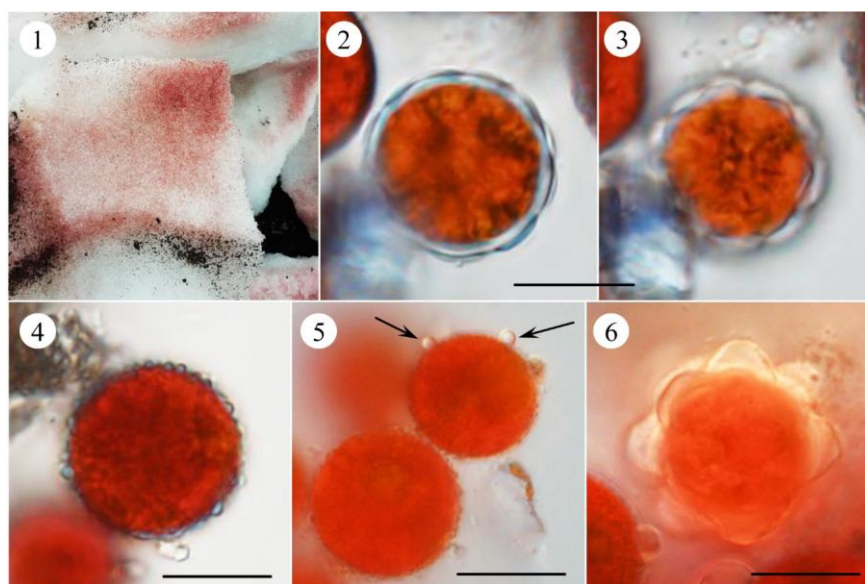


Рис. 2. Каротиногенный вид зеленой микроводоросли *Chlamydomonas nivalis* в почве и на снегу часто находился в виде толстостенных покоящихся цист с буграми на поверхности, а также в виде разноразмерных покоящихся клеток пурпурно-красного цвета: 1 – красный («арбузный») снег на вулкане Горелом; 2–4, 6 – цисты, собранные в почве и на снегу; 5 – липидные капли на поверхности клеток (показаны стрелками). Масштабная линейка: 20 мкм

Fig. 2. The carotenogenic green microalgae *Chlamydomonas nivalis* was often found in soil and snow as thick-walled dormant cysts with tubercles on the surface, and also as various-sized dormant purple-red cells: 1 – red (“watermelon”) snow on Gorely volcano; 2–4, 6 – cysts collected in soil and snow; 5 – lipid droplets on the cell surface (indicate by arrows). Scale bar: 20 μm

Таким образом, с учетом изменений видовых названий и наших новых находок, современный список видов пресноводных и почвенных водорослей Камчатки включает 349 видов, из них к почвенным мы относим 142 вида [Клочкова и др., 2025б]. Уточним, что многие виды были отнесены нами к группе почвенных только на основании описания мест их сбора, указанных в монографии А.А. Еленкина, – «торфя-

ные лужи», «торфяные болота», «торф», «тундра» [Еленкин, 1914], однако очевидно, что в случае многих видов необходимо уточнение. Особенно это касается подвижных диатомовых и конъюгатных водорослей.

Наиболее многочисленными по видовому составу являются диатомовые, сине-зеленые, конъюгатные и зеленые водоросли (по 121, 86, 76, 50 видов соответственно).

### Сине-зеленые водоросли – 86 видов

1. *Anabaena catenula* Kützing ex Bornet & Flahault, 1886
2. *Anagnostidinema amphibium* (Gomont) Strunecký, Bohunická, Johansen & Komárek, 2017
3. *Arthrospira jenneri* Stizenberger ex Gomont, 1892
4. *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault, 1886
5. *Aphanocapsa grevillei* (Berkele) Rabenhorst, 1865
6. *Aphanocapsa thermalis* Brügger, 1863
7. *Aphanothece bullosa* (Meneghini) Rabenhorst, 1865
8. *Aphanothece globosa* Elenkin, 1914
9. *Aphanothece elabens* (Brebisson ex Meneghini) Elenkin, 1936
10. *Aphanothece stagnina* (Sprengel) Braun, 1863
11. *Calothrix thermalis* Hansgirg ex Bornet & Flahault, 1886
12. *Capsosira brebissonii* Kützing ex Bornet & Flahault, 1886
13. *Chamaesiphon confervicola* Braun, 1864
14. *Chamaesiphon incrustans* Grunow, 1865
15. *Chamaesiphon minutus* (Rostafinski) Lemmermann, 1907
16. *Chroococcus pallidus* Nägeli, 1849
17. *Chroococcus turgidus* (Kützing) Nägeli, 1849
18. *Cyanothece aeruginosa* (Nägeli) Komárek, 1976
19. *Cylindrospermum michailovskoense* Elenkin, 1911
20. *Cylindrospermum stagnale* Bornet & Flahault, 1886
21. *Desmonostoc muscorum* (Bornet & Flahault) Hrouzek & Ventura, 2013
22. *Dichothrix baueriana* Bornet & Flahault, 1886
23. *Dichothrix compacta* Bornet & Flahault, 1886
24. *Dichothrix gypsophila* Bornet & Flahault, 1886
25. *Dolichospermum circinale* (Rabenhorst ex Bornet & Flahault) Wacklin, Hoffmann & Komárek, 2009
26. *Dolichospermum delicatulum* (Lemmermann) Wacklin, Hoffmann & Komárek, 2009
27. *Dolichospermum flos-aquae* (Bornet & Flahault) Wacklin, Hoffmann & Komárek, 2009
28. *Dolichospermum lemmermannii* (Richter) Wacklin, Hoffmann & Komárek, 2009
29. *Dolichospermum macrosporum* (Klebahn) Wacklin, Hoffmann & Komárek, 2009
30. *Dolichospermum spiroides* (Klebahn) Wacklin, Hoffmann & Komárek, 2009
31. *Gloeocapsa sanguinea* (C. Agardh) Kützing, 1843

32. *Gloeotrichia intermedia* (Lemmermann) Geitler, 1925
33. *Gloeotrichia kamtschatica* (Elenkin) Poljansky, 1949
34. *Gloeotrichia natans* Rabenhorst ex Bornet & Flahault, 1886
35. *Gloeotrichia pisum* Thuret ex Bornet & Flahault, 1886
36. *Hapalosiphon hibernicus* West & West, 1896
37. *Hapalosiphon major* Tilden, 1896
38. *Hapalosiphon pumilus* Kirchner ex Bornet & Flahault, 1887
39. *Jaaginema geminatum* (Schwabe ex Gomont) Anagnostidis & Komárek, 1988
40. *Kamptonema cortianum* (Meneghini ex Gomont) Strunecký, Komárek & Smarda, 2014
41. *Kamptonema formosum* (Bory ex Gomont) Strunecký, Komárek & Smarda, 2014
42. *Leptolyngbya angustissima* (West & West) Anagnostidis & Komárek, 1988
43. *Leptolyngbya laminosa* (Gomont) Anagnostidis & Komárek, 1988
44. *Leptolyngbya tenuis* (Gomont) Anagnostidis & Komárek, 1988
45. *Leptolyngbya thermophila* (Elenkin) Anagnostidis, 2001
46. *Leptolyngbya valderiana* (Gomont) Anagnostidis & Komárek, 1988
47. *Lyngbya aestuarii* Liebman ex Gomont, 1892
48. *Mastigocladus laminosus* Cohn ex Kirchner, 1898
49. *Microcoleus autumnalis* (Gomont) Strunecky, Komárek & Johansen, 2013
50. *Microcystis aeruginosa* Kützing, 1846
51. *Microcystis pulverea* (Wood) Forti, 1907
52. *Merismopedia elegans* Braun ex Kützing, 1849
53. *Merismopedia glauca* (Ehrenberg) Kützing, 1845
54. *Merismopedia tenuissima* Lemmermann, 1898
55. *Merismopedia thermalis* Kützing, 1843
56. *Nostoc carneum* C. Agardh ex Bornet & Flahault, 1886
57. *Nostoc commune* Vaucher ex Bornet & Flahault, 1888
58. *Nostoc kihlmanii* Lemmermann, 1900
59. *Nostoc linckia* Bornet ex Bornet & Flahault, 1886
60. *Nostoc pruniforme* C. Agardh ex Bornet & Flahault, 1886
61. *Nostoc riabuschinskii* Elenkin, 1914
62. *Nostoc sphaericum* Vaucher ex Bornet & Flahault, 1886
63. *Nostoc verrucosum* Vaucher ex Bornet & Flahault, 1886
64. *Nostoc zetterstedtii* Areschoug ex Bornet & Flahault, 1886
65. *Oscillatoria limosa* C. Agardh ex Gomont, 1892
66. *Oscillatoria princeps* Vaucher, 1892
67. *Oscillatoria tenuis* C. Agardh ex Gomont, 1892
68. *Planktothrix agardhii* (Gomont) Anagnostidis & Komárek, 1988
69. *Planktothrix rubescens* (De Candolle ex Gomont) Anagnostidis & Komárek, 1988
70. *Phormidium chalybeum* (Mertens ex Gomont) Anagnostidis & Komárek, 1988
71. *Phormidium irriguum* (Kützing ex Gomont) Anagnostidis & Komárek, 1988
72. *Phormidium pallidum* Elenkin, 1914
73. *Phormidium uncinatum* Gomont, 1892
74. *Planktolyngbya limnetica* (Lemmermann) Komárková-Legnerová & Cronberg, 1992
75. *Planktolyngbya bipunctata* (Lemmermann) Anagnostidis & Komárek, 1988

76. *Scytonema mirabile* Bornet, 1889
77. *Spirulina abbreviata* Lemmermann, 1895
78. *Spirulina caldaria* Tilden, 1898
79. *Spirulina major* Kützing ex Gomont, 1892
80. *Spirulina subtilissima* Kützing ex Gomont, 1892
81. *Stigonema informe* Kützing ex Bornet & Flahault, 1886
82. *Stigonema ocellatum* Thuret ex Bornet & Flahault, 1886
83. *Stigonema panniforme* Bornet & Flahault, 1887
84. *Stigonema tomentosum* Hieronymus, 1895
85. *Symploca thermalis* Gomont, 1892
86. *Tolypothrix tenuis* Kützing ex Bornet & Flahault, 1886

#### **Золотистые водоросли – 5 видов**

87. *Chrysophaerella longispina* Lauterborn, 1896
88. *Dinobryon cylindricum* Imhof, 1887
89. *Dinobryon sociale* (Ehrenberg) Ehrenberg, 1834
90. *Mallomonas caudata* Iwanoff [Ivanov], 1899
91. *Synura uvella* Ehrenberg, 1834

#### **Разножгутиковые (желто-зеленые) водоросли – 1 вид**

92. *Tribonema bombycinum* (C. Agardh) Derbes & Solier, 1851

#### **Динофлагелляты (динофитовые водоросли) – 4 вида**

93. *Ceratium hirundinella* (Müller) Dujardin, 1841
94. *Peridinium bipes* Stein, 1883
95. *Peridinium cinctum* (Müller) Ehrenberg, 1832
96. *Peridinium cinctum* f. *westii* (Lemmermann) Lindemann, 1925

#### **Конъюгатные и зигнемофициевые водоросли – 76 видов**

97. *Actinotaenium crassiusculum* (De Bary) Teiling, 1954
98. *Actinotaenium curtum* (Brebisson ex Ralfs) Teiling ex Růžička & Pouzar, 1978
99. *Bambusina borreri* (Ralfs) Cleve, 1864
100. *Closterium costatum* Corda ex Ralfs, 1848
101. *Closterium cynthia* De Notaris, 1867
102. *Closterium diana* Ehrenberg ex Ralfs, 1848
103. *Closterium didymotocum* Corda ex Ralfs, 1848
104. *Closterium directum* Archer, 1862
105. *Closterium lineatum* Ehrenberg ex Ralfs, 1848
106. *Closterium moniliferum* Ehrenberg ex Ralfs, 1848
107. *Closterium navicula* (Brebisson) Lütkemüller, 1905
108. *Closterium ralfsii* Brebisson ex Ralfs, 1848
109. *Closterium rostratum* Ehrenberg ex Ralfs, 1848
110. *Closterium setaceum* Ehrenberg ex Ralfs, 1848
111. *Closterium strigosum* Brebisson, 1856
112. *Closterium turgidum* Ehrenberg ex Ralfs, 1848

113. *Closterium venus* Kützing ex Ralfs, 1848
114. *Cosmarium arnellii* Boldt, 1885
115. *Cosmarium biretum* Brebisson ex Ralfs, 1848
116. *Cosmarium blyttii* Wille, 1880
117. *Cosmarium botrytis* Meneghini ex Ralfs, 1848
118. *Cosmarium calidum* Elenkin, 1914
119. *Cosmarium crenatum* Ralfs ex Ralfs, 1848
120. *Cosmarium exiguum* Archer, 1864
121. *Cosmarium margaritiferum* Meneghini ex Ralfs, 1848
122. *Cosmarium meneghini* Brebisson ex Ralfs, 1848
123. *Cosmarium nitidulum* De Notaris, 1867
124. *Cosmarium orbiculatum* Ralfs ex Ralfs, 1848
125. *Cosmarium porteanum* Archer, 1860
126. *Cosmarium pseudopyramidatum* Lundell, 1871
127. *Cosmarium punctulatum* Brebisson, 1856
128. *Cosmarium quadratum* Ralfs ex Ralfs, 1848
129. *Cosmarium quadrifarium* Lundell, 1871
130. *Cosmarium reniforme* (Ralfs) Archer, 1874
131. *Cosmarium subtumidum* Nordstedt, 1878
132. *Cosmarium tetraophthalmum* Brebisson ex Ralfs, 1848
133. *Cosmarium undulatum* Corda ex Ralfs, 1848
134. *Desmidium baileyi* (Ralfs) Nordstedt, 1880
135. *Desmidium cylindricum* Greville ex Nordstedt, 1873
136. *Desmidium swartzii* C. Agardh ex Ralfs, 1848
137. *Docidium undulatum* Bailey, 1851
138. *Euastrum bidentatum* Nägeli, 1849
139. *Euastrum binale* Ehrenberg ex Ralfs, 1848
140. *Euastrum denticulatum* Gay, 1884
141. *Euastrum divaricatum* Lundell, 1871
142. *Euastrum gemmatum* Ralfs, 1848
143. *Euastrum neosinuosum* Anissimova & Guiry, 2021
144. *Euastrum pectinatum* Brebisson ex Ralfs, 1848
145. *Euastrum pulchellum* Brebisson, 1856
146. *Euastrum sibiricum* Boldt, 1885
147. *Haplotaenium minutum* (Ralfs) Bando, 1988
148. *Hyalotheca dissiliens* Brebisson ex Ralfs, 1848
149. *Micrasterias fimbriata* Ralfs, 1848
150. *Netrium oblongum* (De Bary) Lütkemüller, 1902
151. *Penium libellula* (Focke ex Nordstedt) Nordstedt, 1888
152. *Penium margaritaceum* Brebisson ex Ralfs, 1848
153. *Pleurotaenium trabecula* Nägeli, 1849
154. *Spirogyra insignis* (Hassall) Kützing, 1849
155. *Spirogyra porticalis* (Müller) Dumortier, 1822
156. *Spirogyra tenuissima* (Hassall) Kützing, 1849

157. *Spirogyra weberi* Kützing, 1843
158. *Spirogyra weberi* var. *grevilleana* (Hassal) Kirchner, 1878
159. *Staurastrum arnellii* Boldt, 1885
160. *Staurastrum echinatum* Brebisson ex Ralfs, 1848
161. *Staurastrum gracile* Ralfs ex Ralfs, 1848
162. *Staurastrum hirsutum* Ehrenberg ex Ralfs, 1848
163. *Staurastrum margaritaceum* Meneghini ex Ralfs, 1848
164. *Staurastrum polytrichum* (Perty) Rabenhorst, 1868
165. *Staurastrum punctulatum* Brebisson 1848
166. *Staurastrum spongiosum* Brebisson ex Ralfs, 1848
167. *Teilingia excavate* (Ralfs ex Ralfs) Bourrelly, 1964
168. *Tetmemorus laevis* var. *minutus* (De Bary) Willi Krieger, 1937
169. *Xanthidium armatum* Brebisson ex Ralfs, 1848
170. *Xanthidium antilopaeum* Kützing, 1849
171. *Xanthidium cristatum* Brebisson ex Ralfs, 1848
172. *Zygnema stellinum* (Müller) C. Agardh, 1824

#### Диатомовые водоросли – 121 вид

173. *Achnanthes coarctata* (Brebisson ex Smith) Grunow, 1880
174. *Achnanthes lanceolata* (Brebisson ex Kützing) Grunow, 1880
175. *Achnanthidium minutissimum* (Kützing) Czarnecki, 1994
176. *Aerophilia roeseana* (Rabenhorst) Danz, Van de Vijver & Kociolek, 2024
177. *Amphipleura pellucida* (Kützing) Kützing, 1844
178. *Amphora ovalis* (Kützing) Kützing, 1844
179. *Anomoeoneis sphaerophora* Pfitzer, 1871
180. *Asterionella formosa* Hassall, 1850
181. *Asterionella tekeli* Williams, Schuster, Cesar & Jüttner, 2023
182. *Asterionella zigzagostellata* Elenkin, 1914
183. *Aulacoseira distans* (Ehrenberg) Simonsen, 1979
184. *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen, 1979
185. *Aulacoseira crenulata* (Ehrenberg) Thwaites, 1848
186. *Brebissonia lanceolata* (C. Agardh) Mahoney & Reimer, 1986
187. *Caloneis bacillum* (Grunow) Cleve, 1894
188. *Chamaepinnularia* sp. [по: Сущенко, Багмет, 2024]
189. *Cocconeis pediculus* Ehrenberg, 1838
190. *Cocconeis placentula* Ehrenberg, 1838
191. *Cosmioneis pusilla* (Smith) Mann & Stickle, 1990
192. *Craticula cuspidate* (Kützing) Mann, 1990
193. *Ctenophora pulchella* (Kützing) Williams & Round, 1986
194. *Cyatopleura elliptica* Smith, 1851
195. *Cymbella affinis* Kützing, 1844
196. *Cymbella cistula* (Ehrenberg) Kirchner, 1878
197. *Cymbella cymbiformis* C. Agardh, 1830
198. *Cymbella lanceolata* C. Agardh, 1830
199. *Cymbopleura inaequalis* (Ehrenberg) Krammer, 2003

200. *Cymbopleura naviculiformis* (Auerswald ex Heiberg) Krammer, 2003
201. *Diatoma elongata* (Lyngbye) C. Agardh, 1824
202. *Diatoma vulgare* Bory, 1824
203. *Didymosphenia geminata* (Lyngbye) Schmidt, 1899
204. *Diploneis ovalis* (Hilse) Cleve, 1891
205. *Ellerbeckia arenaria* (Moore ex Ralfs) Dorofeyuk & Kulikovskiy, 2012
206. *Encyonema elginense* (Krammer) Mann, 1990
207. *Encyonema ventricosum* (C. Agardh) Grunow, 1875
208. *Epithemia adnata* (Kützing) Brebisson, 1838
209. *Epithemia gibba* (Ehrenberg) Kützing, 1844
210. *Epithemia operculate* (C. Agardh) Ruck & Nakov, 2016
211. *Epithemia sores* Kützing, 1844
212. *Epithemia turgida* (Ehrenberg) Kützing, 1844
213. *Eunotia arcus* Ehrenberg, 1837
214. *Eunotia botuliformis* Wang, 1998
215. *Eunotia curtagrunowii* Nörpel-Schempp & Lange-Bertalot, 1996
216. *Eunotia major* (Smith) Rabenhorst, 1864
217. *Eunotia rhomboidea* Hustedt, 1950
218. *Eunotia robusta* Ralfs, 1861
219. *Eunotia palatina* Lange-Bertalot & Krüge, 2011
220. *Fragilaria capucina* Desmazières, 1830
221. *Fragilaria radians* (Kützing) Williams & Round, 1988
222. *Fragilariforma virescens* (Ralfs) Williams & Round, 1988
223. *Frustulia rhomboides* (Ehrenberg) De Toni, 1891
224. *Gomphonema acuminatum* Ehrenberg, 1832
225. *Gomphonema constrictum* Ehrenberg, 1844
226. *Gomphonema gracile* Ehrenberg, 1838
227. *Gomphonella olivacea* (Hornemann) Rabenhorst, 1853
228. *Gomphonema reichardtii* Lange-Bertalot, 1996
229. *Hannaea arcus* (Ehrenberg) Patrick, 1966
230. *Hantzschia amphioxys* (Ehrenberg) Grunow, 1880
231. *Humidophila arcuata* (Heiden) Lowe, Kociolek, Johansen, Van de Vijver, Lange-Bertalot & Kopalová, 2014
232. *Humidophila sceppacuerciae* Kopalová, 2015
233. *Iconella biseriata* (Brebisson) Ruck & Nakov, 2016
234. *Iconella linearis* (Smith) Ruck & Nakov, 2016
235. *Iconella splendida* (Ehrenberg) Ruck & Nakov, 2016
236. *Kurtkrammeria aequalis* (Smith) Bahls, 2015
237. *Lindavia antiqua* (Smith) Nakov, Guillory, Julius, Theriot & Alverson, 2015
238. *Lindavia comta* (Kützing) Nakov, 2015
239. *Lineaperpetua lacustris* (Grunow) Yu, You, Kociolek & Wang, 2023
240. *Melosira varians* C. Agardh, 1827
241. *Meridion circulare* (Greville) C. Agardh, 1831
242. *Meridion constrictum* Ralfs, 1843

243. *Navicula cryptocephala* Kützing, 1844
244. *Navicula inflata* Gandhi, 1970
245. *Navicula radiosa* Kützing, 1844
246. *Navicula rhynchocephala* Kützing, 1844
247. *Nitzschia acicularis* (Kützing) Smith, 1853
248. *Nitzschia fonticola* (Grunow) Grunow (Grunow) Grunow, 1881
249. *Nitzschia palea* (Kützing) Smith, 1856
250. *Nitzschia sigmoidea* (Nitzsch) Smith, 1853
251. *Nitzschia sigma* (Kützing) Smith, 1853
252. *Nitzschia thermalis* (Ehrenberg) Auerswald, 1861
253. *Nitzschia* sp. [по: Сущенко, Багмет, 2024]
254. *Nupela tenuicephala* (Hustedt) Lange-Bertalot, 1998
255. *Odontidium hyemale* (Roth) Kützing, 1844
256. *Pinnularia appendiculata* (C. Agardh) Schaarschmidt, 1881
257. *Pinnularia borealis* Ehrenberg, 1843
258. *Pinnularia brebissonii* (Kützing) Rabenhorst, 1864
259. *Pinnularia bullacostae* Krammer & Lange-Bertalot, 1999
260. *Pinnularia curtispinulosa* Lange-Bertalot, Krammer & Rumrich, 2000
261. *Pinnularia interrupta* Smith, 1853
262. *Pinnularia major* (Kützing) Rabenhorst, 1853
263. *Pinnularia mesolepta* (Ehrenberg) Smith, 1853
264. *Pinnularia nobilis* (Ehrenberg) Ehrenberg, 1843
265. *Pinnularia obscura* Krasske, 1932
266. *Pinnularia parva* Gregory, 1854
267. *Pinnularia subcapitata* Gregory, 1856
268. *Pinnularia viridis* (Nitzsch) Ehrenberg, 1843
269. *Pinnularia* sp. [по: Сущенко, Багмет, 2024]
270. *Psammothidium acidoclinatum* (Lange-Bertalot) Lange-Bertalot, 1999
271. *Psammothidium lacustre* Enache et Potapova, 2013
272. *Pseudoeunotia biceps* (Ehrenberg) De Toni, 1892
273. *Pseudoeunotia flexuosa* (Brebisson) Grunow
274. *Pseudoeunotia lunaris* (Ehrenberg), Grunow
275. *Rhoicosphenia abbreviate* (C. Agardh) Lange-Bertalot, 1980
276. *Rhopalodia gibba* (Ehrenberg) Müller, 1895
277. *Sellaphora atomoides* (Grunow) Wetzel & Van de Vijver, 2015
278. *Sellaphora pupula* (Kützing) Mereschkovsky, 1902
279. *Sellaphora saugerresii* (Desmazieres) Wetzel & Mann, 2015
280. *Stauroneis anceps* Ehrenberg, 1843
281. *Stauroneis borrichii* (Petersen) Lund, 1946
282. *Stauroneis phoenicenteron* (Nitzsch) Ehrenberg, 1843
283. *Staurosira construens* Ehrenberg, 1843
284. *Staurosirella crux* (Ehrenberg) Van de Vijver & Kusber, 2024
285. *Staurosirella mutabilis* (Smith) Morales & Van de Vijver, 2015
286. *Stephanodiscus hantzschii* Grunow, 1880

287. *Stephanocyclus meneghinianus* (Kützing) Kulikovskiy, Genkal & Kociolek, 2022
288. *Surirella librile* (Ehrenberg) Ehrenberg, 1845
289. *Tabellaria fenestrata* (Lyngbye) Kützing, 1844
290. *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kützing, 1844
291. *Tryblionella parvula* (Smith) Ohtsuka & Fujita, 2001
292. *Ulnaria acus* (Kützing) Aboal, 2003
293. *Ulnaria ulna* (Nitzsch) Compère, 2001

#### Зеленые водоросли – 50 видов

294. *Aegagropila linnaei* Kützing, 1843
295. *Ankistrodesmus spiralis* (Turner) Lemmermann, 1908
296. *Botryococcus braunii* Kützing, 1849
297. *Bulbochaete nana* Wittrock ex Hirn, 1900
298. *Cladophora fracta* (Müller ex Vahl) Kützing, 1843
299. *Cladophora glomerata* (Linnaeus) Kützing, 1843
300. *Chlamydomonas nivalis* (Bauer) Wille, 1903
301. *Chlorella* cf. *vulgaris* Beijer, 1890
302. *Chlorococcum* sp.
303. *Chlorolilaea mutnoviae* Gontcharov et al., 2022
304. *Coelastrum cambricum* Archer, 1868
305. *Coelastrum sphaericum* Nägeli, 1849
306. *Coleochaete orbicularis* Pringsheim, 1860
307. *Coleochaete scutata* Brebisson, 1844
308. *Eremochloris kamchatica* Abdullin & Gontcharov, 2022
309. *Eudorina elegans* Ehrenberg, 1832
310. *Gloeocystis vesiculosa* Nägeli, 1849
311. *Gloeocystis gigas* (Kützing) Lagerheim, 1883
312. *Gloeocystis infusionum* (Schrank) West & West, 1897
313. *Gongrosira viridis* (Kützing) De Toni, 1889
314. *Gonium pectorale* Müller, 1773
315. *Hydrodictyon reticulatum* (Linnaeus) Bory, 1824
316. *Klebsormidium subtile* (Kützing) Mikhailyuk, Glaser, Holzinger & Karsten, 2015
317. *Microspora amoena* (Kützing) Rabenhorst, 1868
318. *Microspora floccosa* (Vaucher) Thuret, 1850
319. *Microspora komarovii* Elenkin, 1914
320. *Mucidosphaerium pulchellum* (Wood) Bock, Proschold & Krienitz, 2011
321. *Oedogonium cryptoporum* Wittrock ex Hirn, 1900
322. *Oedogonium itzigsohnii* De Bary ex Hirn, 1900
323. *Pandorina morum* (Müller) Bory, 1826
324. *Pediastrum boryanum* (Turpin) Meneghini, 1840
325. *Pediastrum duplex* Meyen, 1829
326. *Pediastrum tetras* (Ehrenberg) Ralfs, 1845
327. *Pleurococcus vulgaris* (Greville) Meneghini, 1842
328. *Prasiola crispa* (Lightfoot) Kützing, 1843
329. *Rhizoclonium hieroglyphicum* (C. Agardh) Kützing, 1845

330. *Scenedesmus quadricauda* (Turpin) Brebisson, 1835
331. *Schizogonium kamtschaticum* Elenkin, 1914
332. *Stigeoclonium tenue* (C. Agardh) Kützing, 1843
333. *Tetrabaena socialis* (Dujardin) Nozaki & Itoh, 1994
334. *Tetradesmus obliquus* (Turpin) Wynne, 2016
335. *Tetraëdron minimum* (Braun) Hansgirg, 1889
336. *Tetraëdron caudatum* (Corda) Hansgirg, 1888
337. *Tetraspora cylindrica* (Wahlenberg) C. Agardh, 1824
338. *Trentepohlia odorata* (Wiggers) Wittrock, 1880
339. *Trentepohlia* sp.
340. *Ulothrix zonata* (Weber & Mohr) Kützing, 1833
341. *Vaucheria bursata* (Müller) C. Agardh, 1811
342. *Volvox globator* Linnaeus, 1758
343. *Volvox aureus* Ehrenberg, 1832

#### Харовые водоросли – 2 вида

344. *Chara globularis* Thuiller, 1799
345. *Nitella flexilis* (Linnaeus) C. Agardh, 1824

#### Красные водоросли – 4 вида

346. *Batrachospermum gelatinosum* (Linnaeus) De Candolle, 1801
347. *Batrachospermum kamtschaticum* C. Agardh, 1821
348. *Batrachospermum turfosum* Bory, 1808
349. *Lemanea fluviatilis* (Linnaeus) C. Agardh, 1811

#### **Определение численности видов водорослей в камчатских почвах разного типа**

В наших исследованиях мы находили от одного до 12 видов из различных отделов водорослей одновременно в почвах из разных районов полуострова. Наименьшее количество видов было обнаружено в почве, охарактеризованной нами как «антропогенная» (вдоль трассы за г. Петропавловском-Камчатским – только один вид цианобактерий, определенный как *Gloeo-trichia kamtschatica*, появившийся за несколько месяцев культивирования в лаборатории). В лабораторной культуре плотно сплетенные ниточки *G. kamtschatica* обильно развивались на дне чашки Петри, опутывая мельчайшие газовые пузырьки, которые

сформировались внутри колоний нитчатых цианобактерий (рис. 3). Данный вид оказался быстрорастущим, очень неприхотливым к условиям среды, включая освещение, температуру, замену питательной среды (т.е. фактически количество доступных микроэлементов).

Больше всего видов водорослей (12 таксонов одновременно) было обнаружено нами в пробах охристой почвы с сельскохозяйственных полей в п. Сосновка (Юго-Восточная Камчатка – диатомовые, сине-зеленые и зеленые водоросли по 2, 1, 9 видов соответственно) и, что удивительно, в почве под многолетним полем инвазивного вида *Lupinus polyphyllus* (Люпин многолистный).

Люпины широко распространены по территории Камчатки (рис. 4). В отноше-

нии этого вида у ученых неоднозначное мнение. На Камчатке его считают довольно агрессивным по отношению к нативной флоре инвазивным видом. Однако другие авторы высказывали мнение, что люпины крайне полезны для плодородия почвы [Чекмарев и др., 2011]. Указывалось, что

посевы люпина фиксируют в среднем 160–180 кг/га атмосферного азота, а при инокуляции семян эффективными штаммами клубеньковых бактерий и благоприятных почвенно-климатических условиях – до 400 кг/га, что соответствует 0,5–1 т аммиачной селитры [Чекмарев и др., 2011].

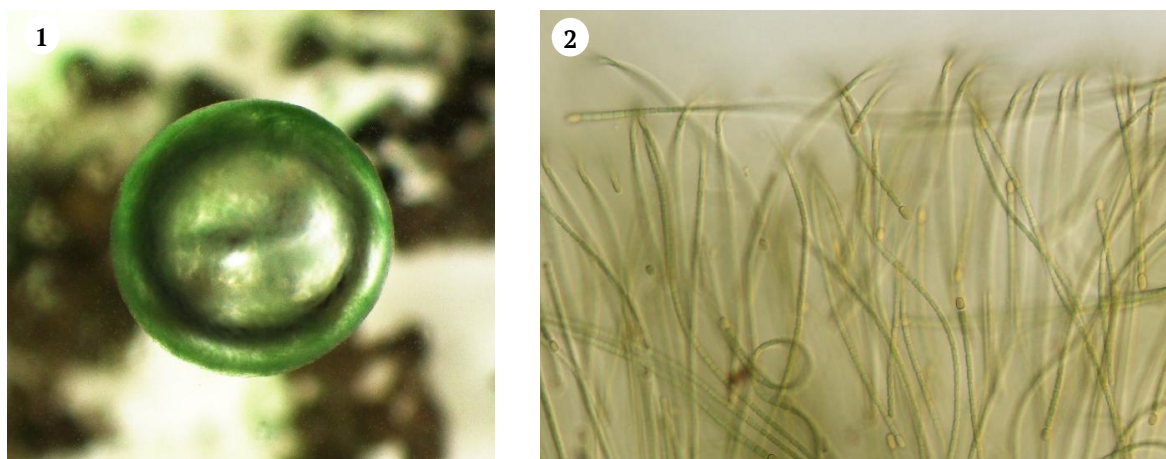


Рис. 3. Цианобактерии *Gloeotrichia kamschatica*, собранные вдоль трассы за г. Петропавловском-Камчатским: 1 – газовый пузырек диаметром 2,5 мм, покрытый колонией нитчатых цианобактерий; 2 – увеличенный под микроскопом край колонии

Fig. 3. Cyanobacteria *Gloeotrichia kamschatica* collected along the highway outside the city of Petropavlovsk-Kamchatsky: 1 – gas bubble about 2.5 mm in diameter covered with a colony of filamentous cyanobacteria; 2 – edge of the colony enlarged under a microscope



Рис. 4. Разноцветные люпины около дома в спальном районе г. Петропавловска-Камчатского. В литературных источниках указывалось, что цвет люпинов изменяется в зависимости от pH почвы. В нашем случае люпины всех оттенков от белого, розового до темно-фиолетового произрастали рядом на одном участке

Fig. 4. Multicolored lupines near a house in a residential area of Petropavlovsk-Kamchatsky. Literary sources indicate that lupine color changes depending on soil pH. In our case, lupines of all shades, from white and pink to deep purple, grew nearby in the same plot

В наших исследованиях в почвах под люпинами видовое разнообразие цианобактерий в 2–3 раза превышало среднее количество их представителей в почвах, не заселенных люпинами. Зеленые и диатомовые водоросли при этом заметно вытеснялись, присутствовали наиболее распространенные на Камчатке их представители (*Chlorococcum* sp., *Trentepohlia* sp., *Pinnularia* sp.). Например, только в одном образце почвы под люпинами, собранном около домов в спальном районе Петропавловска-Камчатского, уже через один месяц культивирования в лаборатории мы обнаружили зеленых, диатомовых и сине-зеленых видов 2, 1, 9 соответственно. Также отметим обилие гетероцист (т. е. дифференцированных клеток нитчатых цианобактерий, осуществляющих азотфиксацию).

Возможно, что количество видов из более чистых природных почв за городом могло быть и больше, однако для бедной видами антропогенной почвы города, тем более камчатской, это количество – высокий показатель. Кроме того, в этом же образце почвы – единственном, в массовом количестве были обнаружены гифы, спорангии и ооспоры псевдогрибка, который мы определили как фитофтора (рис. 5). Таким образом, если судить о полезности люпинов по количеству видов в почвенном микробиоме под ними, то отчасти они полезные, поскольку обогащают минеральный состав почвы и способствуют бурному росту азотфиксирующих цианобактерий.

Диатомовые часто оказывались наиболее неустойчивыми к неблагоприятным условиям среды, таким как резкие перепады температуры, иссушение. Так, в наших исследованиях представители этой группы выдерживали от трех дней до 2–3 недель иссушения, в зависимости от вида, в то время как сине-зеленые и зеленые водоросли были способны восстановить свой

рост и размножение даже через несколько лет после полного иссушения.

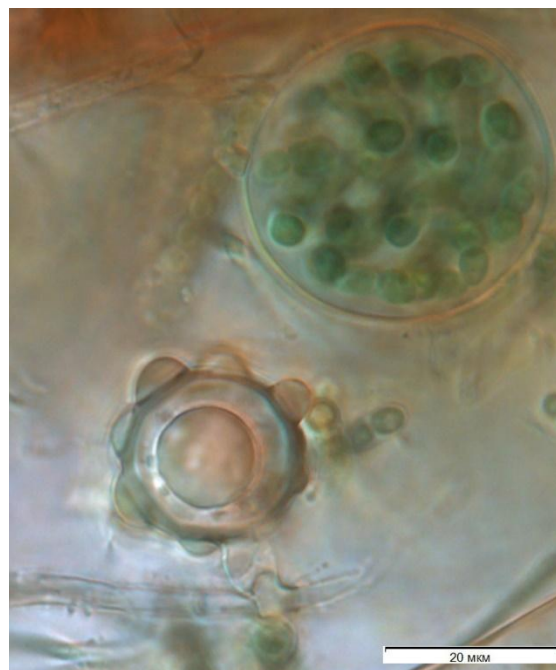


Рис. 5. Ооспора почвенного грибка, определенно нами как фитофтора, из образца почвы под полем люпинов. Также видна колония цианобактерий *Nostoc linckia*

Fig. 5. Oospore of a soil fungus, identified as *Phytophthora*, from a soil sample under a lupine field. Colony of the cyanobacteria *Nostoc linckia* is also visible

Отличительной особенностью наших данных является то, что они отличаются от количественных данных, заявленных в статьях других авторов по флоре почвенных водорослей вулканов юга Камчатки [Аллагуватова и др., 2021; Сущенко, Багмет, 2024]. Отметим, что многие виды в списках указанных авторов [Аллагуватова и др., 2021; Сущенко, Багмет, 2024] вообще не упоминались в монографии А.А. Еленкина [Еленкин, 1914], а 11% указанных в статьях видов оказались новыми для флоры России. Поскольку вулканы Камчатки ежегодно посещаются тысячами туристов со всех частей света, можно предположить, что часть видов – инвазивные.

Почвенные водоросли чрезвычайно устойчивы и могут быть занесены на новые территории с альпинистским снаряжением, также на подошве обуви прибывающих туристов. Только за период с июня по июль 2025 г. количество посетивших Камчатку составило 91 089 человек. Поэтому при выборе районов исследования мы выбирали природные местообитания, которые не являлись местами массового турпотока, чтобы, насколько это возможно, исключить фактор интродукции чужеродных видов.

Для уточнения объема многих таксонов и видовых ареалов требуется молекулярно-генетическое изучение материала, собранного в пределах всего Камчатского края.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование было частично выполнено при поддержке государственного задания Федерального агентства по рыболовству ([Клочкова и др., 2025б]; Рег. № НИОКТР 226011922377-6; eLIBRARY ID: 90578088, EDN: DGMTGO).

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### ЛИТЕРАТУРА

- Аллагуватова Р.З., Багмет В.Б., Никулин А.Ю. и др. 2021. К флоре цианобактерий и водорослей вулканических почв и грунтов вулкана Шивелуч. *Вопросы современной альгологии*. № 2 (26). С. 135–138. URL: [https://doi.org/10.33624/2311-0147-2021-2\(26\)-135-138](https://doi.org/10.33624/2311-0147-2021-2(26)-135-138).
- Аллагуватова Р.З., Никулин А.Ю., Багмет В.Б. и др. 2022. Биоразнообразие цианобактерий и водорослей пирокластических отложений и почв вулканов юга Камчатки. *Вестник ДВО РАН*. № 5. С. 75–87.
- Еленкин А.А. 1914. Пресноводные водоросли Камчатки. *Труды Камчатской экспедиции Ф.П. Рябушинского*. Москва. 642 с.
- Ефимова М.В. 2005. Синезеленые водоросли (цианобактерии) поверхностных термопроявлений Камчатки и возможности их использования в биотехнологии. *Диссертация ... канд. биол. наук*. Владивосток. 151 с.
- Клочкова Т.А., Ермакова С.В. 2020. Биологическая и экологическая характеристика почв сельскохозяйственных угодий на территории Елизовского района (Камчатский край). *Материалы Девятой международной научно-практической конференции «Развитие теории и практики управления социальными и экономическими системами»*. С. 119–122.
- Клочкова Т.А., Климова А.В., Васильев М.В. и др. 2023. Морская экология: Разработка биотехники выращивания бурых водорослей Камчатского края для санитарной марикультуры и восстановления их естественных популяций – Этап 2. *Отчет о НИР*. Федеральное агентство по рыболовству. Рег. № НИОКТР 122040600047-4. 85 с. eLIBRARY ID: 64908062, EDN: UNTSVI.
- Клочкова Т.А., Васильев М.В., Клочкова Н.Г. 2025а. Ламинариевые водоросли морей российского Дальнего Востока: ревизия молекулярно-генетической информации (по данным из NCBI). *Вестник Камчатского государственного технического университета*. Вып. 74. С. 44–72. URL: <http://doi.org/10.17217/2079-0333-2025-74-44-72>.
- Клочкова Т.А., Васильев М.В., Матвеева Е.В. и др. 2025б. Агроэкология: определение продуктивности камчатских почв по видовому составу и численно-

- сти микроорганизмов. *Отчет о НИР*. Федеральное агентство по рыболовству. Рег. № НИОКТР 226011922377-6. 178 с. eLIBRARY ID: 90578088, EDN: DGMTGO.
- Клочкова Т.А., Позолотина Л.А., Климова А.В. и др. 2025в. Морская экология: Разработка биотехники выращивания бурых водорослей Камчатского края для санитарной марикультуры и восстановления их естественных популяций – Этап 3. *Отчет о НИР*. Федеральное агентство по рыболовству. Рег. № НИОКТР 225012302014-0. 74 с. eLIBRARY ID: 82665626, EDN: WXGCRB.
- Кузякина Т.И. 2000. Экология и геохимическая деятельность микроорганизмов на активных вулканах и в гидротермах: Остров Кунашир, Курильские острова, Камчатка. *Диссертация ... д-ра биол. наук*. Петропавловск-Камчатский. 306 с.
- Сущенко Р.З., Багмет В.Б. 2024. Диатомовые почв и пирокластических отложений вулканов юга Камчатки (Россия). *Ботанический журнал*. Т. 109. № 3. С. 227–243. URL: <https://doi.org/10.31857/S0006813624030016>.
- Штина Э.А., Голлербах М.М. 1976. Экология почвенных водорослей. Москва: Наука. 143 с.
- Чекмарев П.А., Артюхов А.И., Юмашев Н.П. и др. 2011. Роль люпина в формировании плодородия почвы. *Достижения науки и техники АПК*. № 10-2011. С. 17–20.
- Abdullin Sh.R. 2013. Cyanobacteriae and algae of lava tubes in Kamchatka, Russia. *Cave and Karst Science*. Vol. 40. № 3. P. 141–144.
- Abdullin S.R., Bagmet V.B., Nikulin A.Yu. et al. 2022. Emended description of the genus *Eremochloris* (Trebouxiophyceae, Chlorophyta), with *Eremochloris kamchatica* sp. nov. from Kamchatka, Russia. *Phycologia*. Vol. 61. P. 175–183.
- DeNicola D.M. 2000. A review of diatoms found in highly acidic environments. *Hydrobiologia*. Vol. 433. P. 111–122.
- Gontcharov A.A., Nikulin A.Yu., Nikulin V.Yu. et al. 2025. Emended diagnosis of the genus *Chlorolilaea* (Chlorophyceae), with the description of *Chlorolilaea mutnoviae* sp. nov. from soils of Kamchatka, Russia. *Phycologia*. Vol. 64. P. 322–330.
- Guiry M.D., Guiry G.M. 2026. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. <http://www.algaebase.org> (assessed: 25.12.2025).
- Kim G.H., Klochkova T.A., Han J.W. et al. 2011. Freshwater and terrestrial algae from Ny-Alesund and Blomstrandhalvoya Islands (Svalbard). *Arctic*. Vol. 64. P. 25–31.
- Klochkova T.A., Kang S.-H., Cho G.Y. et al. 2006. Biology of a terrestrial green alga, *Chlorococcum* sp. (Chlorococcales, Chlorophyta), collected from the Miruksazi stupa in Korea. *Phycologia*. Vol. 45. P. 349–358.
- National Center for Biotechnology Information (NCBI). 2026. GenBank. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov> (assessed: 01.12.2025).

## REFERENCES

- Allaguvatova R.Z., Bagmet V.B., Nikulin A.Yu. et al. 2021. Materials to cyanobacterial and algal flora from volcanic soils of Shiveluch volcano. *Voprosy sovremennoi algologii (Issues of Modern Algology)*. № 2(26). P. 135–138. URL: [https://doi.org/10.33624/2311-0147-2021-2\(26\)-135-138](https://doi.org/10.33624/2311-0147-2021-2(26)-135-138) (in Russian).
- Allaguvatova R.Z., Nikulin A.Yu., Bagmet V.B. et al. 2022. Cyanobacteria and algae bio-

- diversity of grounds and soils from south Kamchatka volcanoes. *Vestnik DVO RAN (Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences)*. № 5. P. 75–87 (in Russian).
- Elenkin A.A. 1914. Freshwater algae of Kamchatka. Proceedings of the Kamchatka expedition of F.P. Ryabushinsky. Moscow. 642 p. (in Russian).
- Efimova M.V. 2005. Blue-green algae (cyanobacteria) of surface thermal manifestations of Kamchatka and the possibilities of their use in biotechnology. *Candidacy dissertation for biological sciences*. Vladivostok. 151 p. (in Russian).
- Klochkova T.A., Ermakova S.V. 2020. Biological and ecological characteristics of agricultural soils on the territory of Yelizovsky municipal district (Kamchatka region). *Proceedings of the Ninth International Scientific and Practical Conference “Development of the Theory and Practice of Management of Social and Economic Systems”*. P. 119–122 (in Russian).
- Klochkova T.A., Klimova A.V., Vasilev M.V. et al. 2023. Marine ecology: Development of biotechnology for growing brown algae of Kamchatka Krai for sanitary mariculture and restoration of their natural populations – Stage 2. *Research Report*. Federal Agency for Fisheries. Reg. № 122040600047-4. 85 p. eLIBRARY ID: 64908062, EDN: UNTSVI (in Russian).
- Klochkova T.A., Vasilev M.V., Klochkova N.G. 2025a. Laminariacean algae from Russian far Eastern seas: Revision of molecular-genetic data (from NCBI database). *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (Bulletin of Kamchatka State Technical University)*. Iss. 74. P. 44–72. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2025-74-44-72> (in Russian).
- Klochkova T.A., Vasilev M.V., Matveeva E.V. et al. 2025b. Agroecology: Determining the productivity of Kamchatka soils based on the species composition and number of microorganisms. *Research Report*. Federal Agency for Fisheries. Reg. № 226011922377-6. 178 p. eLIBRARY ID: 90578088, EDN: DGMTGO (in Russian).
- Klochkova T.A., Pozolotina L.A., Klimova A.V. et al. 2025b. Marine ecology: Development of biotechnology for growing brown algae of Kamchatka Krai for sanitary mariculture and restoration of their natural populations – Stage 3. *Research Report*. Federal Agency for Fisheries. Reg. № 225012302014-0. 74 p. eLIBRARY ID: 82665626, EDN: WXGCRB (in Russian).
- Kuzyakina T.I. 2000. Ecology and geochemical activity of microorganisms on active volcanoes and in hydrothermal vents: Kunashir Island, Kuril Islands, Kamchatka. *Doctoral dissertation for biological sciences*. Petropavlovsk-Kamchatsky. 306 p. (in Russian).
- Sushchenko R.Z., Bagmet V.B. 2024. Diatoms of soils and pyroclastic deposits from south Kamchatka volcanoes. *Botanicheskiy zhurnal (Botanical Journal)*. Vol. 109. № 3. P. 227–243. URL: <https://doi.org/10.31857/S0006813624030016> (in Russian).
- Shtina E.A., Gollerbach M.M. 1976. Ecology of soil algae. Moscow: Nauka Publ. 143 p. (in Russian).
- Chekmarev P.A., Artyukhov A.I., Yumashev N.P. et al. 2011. The role of lupine in the formation of soil fertility. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK (Achievements of Science and Technology of the Agro-industrial Complex)*. № 10-2011. P. 17–20 (in Russian).
- Abdullin Sh.R. 2013. Cyanobacteriae and algae of lava tubes in Kamchatka, Russia. *Cave and Karst Science*. Vol. 40. № 3. P. 141–144.
- Abdullin S.R., Bagmet V.B., Nikulin A.Yu. et al. 2022. Emended description of the

- genus *Eremochloris* (Trebouxiophyceae, Chlorophyta), with *Eremochloris kamchatica* sp. nov. from Kamchatka, Russia. *Phycologia*. Vol. 61. P. 175–183.
- DeNicola D.M. 2000. A review of diatoms found in highly acidic environments. *Hydrobiologia*. Vol. 433. P. 111–122.
- Gontcharov A.A., Nikulin A.Yu., Nikulin V.Yu. et al. 2025. Emended diagnosis of the genus *Chlorolilaea* (Chlorophyceae), with the description of *Chlorolilaea mutnoviae* sp. nov. from soils of Kamchatka, Russia. *Phycologia*. Vol. 64. P. 322–330.
- Guiry M.D., Guiry G.M. 2026. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway <http://www.algaebase.org> (assessed: 25.12.2025).
- Kim G.H., Klochkova T.A., Han J.W. et al. 2011. Freshwater and terrestrial algae from Ny-Alesund and Blomstrandhalvoya Islands (Svalbard). *Arctic*. Vol. 64. P. 25–31.
- Klochkova T.A., Kang S.-H., Cho G.Y. et al. 2006. Biology of a terrestrial green alga, *Chlorococcum* sp. (Chlorococcales, Chlorophyta), collected from the Miruksazi stupa in Korea. *Phycologia*. Vol. 45. P. 349–358.
- National Center for Biotechnology Information (NCBI). 2026. GenBank. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov> (assessed: 01.12.2025).

#### 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; Researcher ID: R-5087-2016; ORCID: 0000-0002-7584-1774.

**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; Researcher ID: R-5087-2016; ORCID: 0000-0002-7584-1774.

**Васильев Максим Владимирович** – Камчатский государственный технический университет; 683003, Россия, Петропавловск-Камчатский; кандидат технических наук, начальник Военного учебного центра; issledovatelmv@mail.ru. SPIN-код: 8832-3966, Author ID: 721967; ORCID: 0009-0009-5361-021X.

**Vasilev Maksim Vladimirovich** – Kamchatka State Technical University; 683003, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Candidate of Technical Sciences, Head of Military Training Center; issledovatelmv@mail.ru. SPIN-code: 8832-3966, Author ID: 721967; ORCID: 0009-0009-5361-021X.

**Питиримов Никита Дмитриевич** – Камчатский государственный технический университет; 683003, Россия, Петропавловск-Камчатский; студент магистратуры, кафедра «Экология и природопользование». SPIN-код: 9451-5176, Author ID: 1278761.

**Pitirimov Nikita Dmitrievich** – Kamchatka State Technical University; 683003, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Master Degree Student of Ecology and Nature Management Chair. SPIN-code: 9451-5176, Author ID: 1278761.

Статья поступила в редакцию 28.02.2026; одобрена после рецензирования 08.06.2026; статья принята к публикации 16.06.2026.

The article was submitted 28.02.2026; approved after reviewing 08.06.2026; accepted for publication 16.06.2026.

Для цитирования: Клочкова Т.А., Васильев М.В., Питиримов Н.Д. 2026. Актуализация списка видов пресноводных и почвенных водорослей Камчатки А.А. Еленкина, 1914 в соответствии с современными данными. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. Вып. 76. С. 91–110. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2026-76-91-110>.

For citation: Klochkova T.A., Vasilev M.V., Pitirimov N.D. 2026. Updating the checklist by A.A. Elenkin (1914) of freshwater and soil algal species from Kamchatka in accordance with modern data. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta (Bulletin of Kamchatka State Technical University)*. Iss. 76. P. 91–110 (in Russian). <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2026-76-91-110>.

Научная статья

УДК 631.4(571.66)

DOI: 10.17217/2079-0333-2026-76-111-127

**ЭКОЛОГО-ТОКСИКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОЧВ  
ПОДНОЖЬЯ МИКИЖИНСКОГО МЫСА ЕЛИЗОВСКОГО РАЙОНА  
ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА**

Швецова А.А.<sup>1</sup>, Пак А.Л.<sup>1</sup>, Чебыкина Е.Ю.<sup>1</sup>, Динкелакер Н.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9.

<sup>2</sup> Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, лит. А.

В настоящей работе было проведено исследование образцов почвы охристого и серогумусового типов, собранных в 2022 г. в районе Микижинского мыса Елизовского района полуострова Камчатка. Были исследованы физико-химические, водно-физические, биологические характеристики почв и морфологическая организация почвенных профилей. Особенностью почв данной территории является их низкая минерализация из-за обогащения вулканическим пеплом, содержащим вулканическое стекло и силикатные минералы.

**Ключевые слова:** вулканические почвы, Камчатка, коэффициент радиальной дифференциации, метаболический коэффициент, тяжелые металлы, эколого-токсикологическая оценка.

Original article

**ECOLOGICAL AND TOXICOLOGICAL ASSESSMENT OF SOILS IN PROXIMITY  
OF MIKIZHINSKY CAPE IN ELIZOVSKY DISTRICT, KAMCHATKA**

Shvetsova A.A.<sup>1</sup>, Pak A.L.<sup>1</sup>, Chebykina E.Yu.<sup>1</sup>, Dinkelaker N.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Universitetskaya Emb. 7-9.

<sup>2</sup> ITMO University, St. Petersburg, Kronverksky Ave. 49, lit. A.

In this study, we examined ocher and gray-humus soil samples collected in 2022 in proximity of Mykizhinsky Cape from the Yelizovsky district in Kamchatka. The physicochemical, hydrophysical, and biological characteristics of soils, as well as the morphological organization of soil profiles, were examined. A characteristic feature of soils in this area was their low mineralization due to enrichment with ashes containing volcanic glasses and silicate minerals.

**Key words:** volcanic soils, Kamchatka, radial differentiation coefficient, metabolic quotient, heavy metals, ecological-toxicological assessment.

## ВВЕДЕНИЕ

Почвы Камчатки по совокупности особенностей формирования весьма специфичны для Евразии из-за разнообразия древесной растительности, наличия горно-тундровых и луговых комплексов, а также характера почвообразующих пород (слоистые пирокластические отложения разного возраста, механического и химического состава) [Казаков, 2022; Казаков, Дульченко, 2024]. Климатические особенности региона и вулканическая активность также играют важную роль в формировании почв на этой территории. Характерной особенностью почв, сформировавшихся в районах активной вулканической деятельности, является наличие в их профиле погребенных гумусовых горизонтов, образованных выпадением пепла. Эти слои пепла, изредка покрывающие поверхность почвы, приводят к формированию сложного многослойного полигенетического почвенного профиля, включающего несколько наложенных друг на друга профилей со слоями пепла, что влияет на «омоложение» почвы за счет погребения ранее существовавших горизонтов [Смелкова, 2007].

На Камчатке одними из наиболее изученных в геохимическом плане являются территории сельскохозяйственных угодий Центрально-Камчатской, Восточно-Камчатской и Западно-Камчатской провинций, поскольку для этих территорий были составлены почвенные карты [Иваненко, 2016].

В ранних исследованиях по почвам Южной провинции Камчатки высказывалось мнение, что для зрелой стадии кальдерообразующей вулканической активности характерны вулканические охристые почвы [Захарихина, 2009а, б]. В них отчетливо выражены охристые горизонты и проявлены иллювиальные процессы, присутствуют зрелые поверхностные органоге-

ные горизонты с содержанием гумуса около 5%, кислой средой (рН 4,8–5,9) органо-генных горизонтов и низкой степенью насыщенности основаниями (6,7–42,5%). Большинство микроэлементов (Be, B, P, Sc, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Sr, Y, Ag) в почвах юго-восточного района Южной провинции Камчатки имели более высокие значения фоновых содержаний, сформированные на основных и средних вулканических пеплах, по сравнению с почвами, развитыми на кислых пирокластических отложениях (западный и центральный районы Южной провинции Камчатки). Также было высказано мнение о существовании регионального геохимического фона микроэлементов в вулканических почвах Камчатки.

В работе С.В. Ермаковой [Ермакова, 2022] рассматривалось загрязнение почв совхозных полей Елизовского района тяжелыми металлами. Так, массовая доля подвижных и кислоторастворимых металлов в почвах не превышала предельно установленные санитарными нормами допустимые концентрации. Исследование почв в г. Петропавловске-Камчатском на содержание тяжелых металлов показало, что валовое содержание Cu, Zn, Pb превышало геохимический фон и показатели фонового участка. По содержанию Cu и Zn почвы города характеризовались как слабо- и среднезагрязненные, однако отдельные районы города были отнесены к категории сильной степени загрязнения [Щитинский и др., 2012].

Целью нашей работы является изучение почв отдельных территорий Елизовского района, в частности у подножья Микижинского мыса (юго-восточная часть полуострова Камчатка).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Почвообразующие породы в Елизовском районе Камчатки включают аллюви-

альные, древнеозерные, ледниковые, делювиальные и элювиальные четвертичные отложения, а также современные осадки. Эти породы имеют сходный петрографический, относительно однородный химический и легкий механический составы. В регионе преобладают вулканические супеси, легкие андезитовые суглинки, различные пески, хрящ и крупный щебень, реже встречаются средние суглинки и глины. Почвы отличаются низким общим содержанием элементов и слабо обеспечены их подвижными формами. Это обусловлено бедным элементным составом самих вулканических пеплов, со-

ставляющих основу почвы, а также уникальными процессами почвообразования, характерными для данного региона [Яськин, Герасимов, 2019].

Исследования проводили с 29 августа по 4 сентября 2022 г. на территории детского оздоровительного лагеря (ДОЛ) «Восход», который занимает площадь в 32,6 га. Нами было заложено шесть почвенных разрезов (рис. 1 и 2). В лаборатории собранные образцы почв высушивали до воздушно-сухого состояния, проводили отбор растительных остатков и антропогенных включений, затем просеивали почвы через сито с размером ячеек 0,25–1 мм.



Рис. 1. Нахождение территории, исследованной авторами статьи, – показана граница ДОЛ «Восход» и отмечены 6 мест отбора проб почвы

Fig. 1. Location of territory investigated by authors of this article and the boundary of “Voskhod” health camp and the soil sampling sites (6 sites in total)

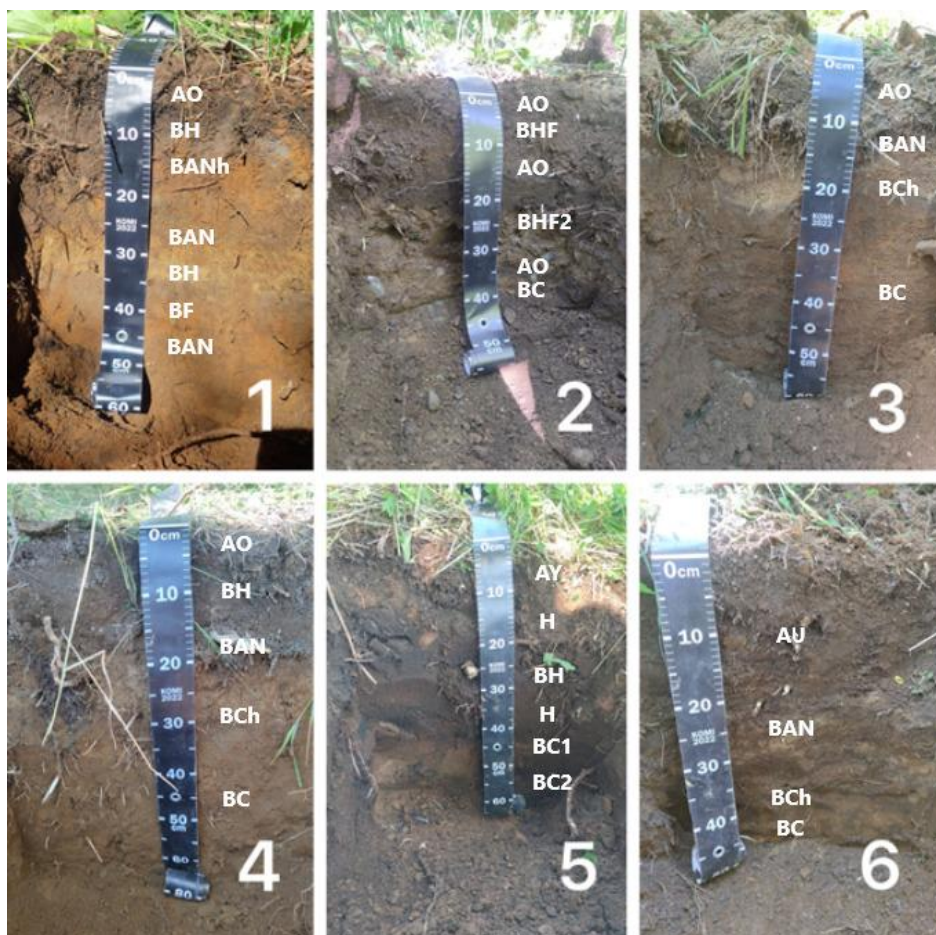


Рис. 2. Изученные почвенные профили

Fig. 2. Investigated soil profiles

Гранулометрический анализ выполнили согласно утвержденной методике [Полевые и лабораторные методы..., 2001]. Значения рН анализировали в водной суспензии и солевой вытяжке (соотношение почвы к раствору 1 : 2,5) [Растворова и др., 1995]. Подвижные соединения калия и фосфора анализировали по ГОСТ Р 54650-2011. Анализ общего азота проводили по ГОСТ Р 58596-2019; содержание углерода и органических веществ – по ГОСТ Р 26213-91. Определение скорости микробного продуцирования CO<sub>2</sub> (базальное и субстрат-индуцированное дыхание (БД и СИД)) проводили методом SID [Anderson, Domsch, 1978]. Далее эти значения использовали для вычисления метаболического коэффи-

циента, показателя интенсивности дыхания микробного сообщества почвы, как отношение БД к С<sub>мик</sub> [Практикум..., 2005]. Коэффициент использовали для оценки экологического состояния почв и их устойчивости к различным факторам, в том числе антропогенным. Содержание тяжелых металлов (Sr, Pb, As, Zn, Ni, Co, Cr, V) в почвах определяли на волнодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре «Спектроскан Макс G» методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) на базе университета ИТМО.

Оценку уровня загрязнения почв определяли по суммарному показателю загрязнения (Z<sub>c</sub>) по формуле (1) [СП 502.1325800, 2021]:

$$Z_c = \sum (K_{ci} + \dots + K_{cn}) - (n - 1), \quad (1)$$

где  $n$  – число определяемых суммируемых веществ;

$K_{ci}$  – коэффициент концентрации  $i$ -го химического элемента, равный кратности превышения его содержания над фоновым значением;

$K_{cn}$  – коэффициент концентрации  $n$ -го химического элемента.

Классификация индекса суммарного загрязнения представлена в таблице 1.

Таблица 1. Классификация индекса суммарного загрязнения [По: МУ 2.1.7.730-99, 1999; СанПиН 1.2.3685-21, 2021]

Table 1. Classification of the total pollution index [From: MU 2.1.7.730-99, 1999; SanPiN 1.2.3685-21, 2021]

Индекс суммарного загрязнения ( $Z_c$ )	
Допустимый	<16
Умеренно опасный	16-32
Опасный	32-128
Чрезвычайно опасный	>128

Для оценки распределения веществ по профилям почвы был использован коэффициент радиальной дифференциации ( $R$ ) [Перельман, Касимов, 1999], который вычисляли по следующей формуле (2):

$$R = C_{i \text{ гор}} / C_{i \text{ пор}}, \quad (2)$$

где  $C_{i \text{ гор}}$  – содержание химического элемента  $i$  в горизонте почвы;

$C_{i \text{ пор}}$  – содержание в породе, где влияние почвообразовательных процессов на химический состав условно пренебрежимо. Этот показатель демонстрирует количественную оценку влияния почвообразования на накопление и рассеивание отдельных химических веществ в различных горизонтах почвы.

Статистическая обработка данных по биологическим свойствам почв производилась с помощью программ Origin 2024, MSExcel 2016.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2 показаны изученные нами почвенные профили на территории ДОЛ «Восход». Исследованные почвы относятся к синлитогенному стволу, включающему в себя вулканический и аллювиальный отделы [Шишов, 2004; Захарихина, 2009а, б; Захарихина, Литвиненко, 2019]. Формирование почв синлитогенных стволов связано с уникальной геологической активностью региона, в частности с периодическими вулканическими пеплопадами. Почвообразование здесь протекает одновременно с аккумуляцией свежего минерального материала. Его поступление приводит к постоянному омолаживанию субстрата и ограничивает формирование почвенного профиля. Аккумуляция материалов с разным гранулометрическим составом на поверхности приводит к вертикальному росту почвенного профиля. Это приводит к образованию слоев разной толщины и степени стратификации, где и происходит современное почвообразование.

Охристые почвы, относящиеся к отделу вулканических почв и находящиеся в аккумулятивных (профили 1, 2) и склоновых позициях (профили 3, 4, 6), образуются в холодном гумидном умеренно-континентальном климате, под травянистыми каменистыми и белоберезовыми лесами, в районах с умеренными пеплопадами и сбалансированным взаимодействием процессов почвообразования и литогенеза. Вулканические пеплопады обеспечивают постоянное поступление свежего минерального материала, который изменяет структуру и химический состав почвы.

При умеренных пеплопадах формируется охристый горизонт, обогащенный оксидами железа и алюминия, что придает почве характерный желтовато-коричневый цвет. В их профиле между грубогумусовым горизонтом АО и охристым горизонтом ВАН часто присутствует темный иллювиально-гумусовый горизонт ВН, который является разновидностью альфегумусового горизонта [Полевой определитель..., 2008]. При уменьшении интенсивности пеплопадов в почвах появляется подзолистый горизонт, а в условиях увеличения суровости и влажности климата альфегумусовые процессы ослабевают, и почвенный профиль состоит только из перегнойного и охристого горизонтов. Аллювиальный серогумусовый тип почв (профиль 5) располагается рядом с урезом воды озера Микижа, и все его горизонты варьируются от светло-серого до темно-серого и буровато-серого цвета. Аллювиально-серогумусовые почвы формируются в условиях, где происходит регулярное оседание осадочного материала, переносимого водой. В данном случае расположение почвенного разреза возле озера Микижа способствует постоянному накоплению свежих озерно-аллювиальных отложений, которые обогащают почву минеральными веществами и органическим материалом. Постоянное поступление органического материала способствует накоплению гумуса, что придает почве ее характерный цвет. Такие почвы отличаются хорошей водопроницаемостью и аэрацией, преобладанием нисходящих токов влаги. В профиле 1, в отличие от остальных, содержался иллювиально-железистый горизонт, придающий рыжевату окраску. Профили 3, 4, 6 имели сходство по профильному строению: ...-ВАН-ВCh-BC. Профиль 5 отличался наличием двух гумусовых горизонтов Н. Также только в профиле 2 встречался альфегумусовый горизонт ВНФ.

В таблице 2 представлены физико-химические характеристики изученных почв. Показатели гигроскопической влажности (ГВ) находились в широком диапазоне от 0,18 до 11,85%. Для исследуемой территории значения рН колебались от 3,4 до 7,3, что характеризует наличие сильнокислых и слабощелочных почв на территории лагеря. Большинство проб можно отнести к сильно- и среднекислым. Содержание органического углерода варьировало от 0,66 до 16,28%. Общий азот находился от 0,02% в охристом горизонте ВАНh до 0,76% в подстилке АО. Оксид калия содержался в диапазоне от 9 до 191 мк/кг. Подвижный фосфор варьирует от 2 до 716 мк/кг. По гранулометрическому составу большинство проб представлены супесями, легкими и средними суглинками.

В охристых почвах в аккумулятивной позиции (профили 1, 2) наблюдалось снижение значений ГВ вниз по профилю, что может быть обусловлено механическим составом, так как верхние горизонты в этих разрезах в основном классифицируются как суглинки, а нижние – как супеси. В аллювиально-серогумусовых почвах (профиль 5) самое высокое значение ГВ (7,89%) было зафиксировано в перегнойном горизонте, который относится к среднесуглинному типу почвы. Этот горизонт богат органическими веществами, что способствует формированию пористой структуры почвы и удержанию влаги. В охристых почвах в склоновой позиции (профили 3, 4, 6), напротив, наблюдалось увеличение показателей ГВ вниз по профилю, что может быть связано с хорошими дренажными условиями.

Большинство низких показателей рН обусловлены тем, что территория исследований располагается в зоне зрелого кальдеобразующего вулканизма с редкими катастрофическими извержениями с тефрой кислого состава [Федоров, 2014]. Образованию кислых почв также способствуют слои-

стые пирокластические отложения, характерные для данного региона. В аллювиально-серогумусовой почве (профиль 5), которая сформирована на озерных отложениях, нижние горизонты показывали нейтральный и слабощелочной рН, обусловленный аллювиальными процессами, которые способствуют накоплению нейтральных и даже щелочных компонентов в почве из-за наносов, которые включают в себя Са, Mg и др.

Общее содержание органического углерода уменьшалось с глубиной почвенно-

го профиля, поскольку процессы гумусообразования и иллювиирования способствуют накоплению органического вещества преимущественно в верхних горизонтах. Хотя органическое вещество может мигрировать вниз по профилю, значительная его часть сохраняется в верхних слоях. Однако эта тенденция существенно менялась в горизонтах Н 5-го почвенного разреза, который представлял собой перегнойный слой, сформированный из разложившихся растительных остатков.

Таблица 2. Физико-химические характеристики почв ДОЛ «Восход»

Table 2. Physico-chemical characteristics of soils collected from Voskhod health camp

Профиль	Горизонт, глубина, см	ГВ, %	рН водн.	рН КCl	C <sub>орг</sub> , %	N, %	K <sub>2</sub> O, мг/кг	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/кг	Физическая глина, %	Класс (по механическому составу)
1	АО 0-8	3,54	4,7	4,2	4,84	0,40	113	48	39,47	Суглинок ср.
	ВН 8-11	1,27	6,8	-*	2,48	0,07	211	192	38,09	Суглинок ср.
	BANh 11-24	0,64	5,8	4,6	1,02	0,02	9	63	13,30	Супесь
	BAN 24-32	2,35	6,3	4,8	0,67	-	-	-	47,67	Суглинок тяж.
	ВН 32-37	2,15	6,2	5,6	2,06	-	-	-	38,69	Суглинок ср.
	BF 37-44	0,69	5,3	4,2	0,74	-	-	-	12,14	Супесь
	BAN 44-50	0,37	5,4	4,2	0,66	-	-	-	12,65	Супесь
2	АО 0-4	1,89	6,1	5,9	5,53	0,24	100	1640	27,08	Суглинок лег.
	ВНF4-11	0,93	5,6	4,3	2,61	0,06	13	28	15,34	Супесь
	АО11-22	1,08	6,1	5,9	2,75	0,15	151	743	24,51	Суглинок лег.
	ВНF2 22-34	0,72	6,2	5,7	2,31	-	-	-	20,35	Суглинок лег.
	АО34-36	1,00	4,2	3,7	2,81	-	-	-	18,59	Супесь
BC 36-42	1,00	3,4	3,2	1,19	-	-	-	23,26	Суглинок лег.	
3	АО 0-10	6,52	5,1	4,7	16,28	0,76	191	52	-	-
	BAN 10-17	4,00	4,9	4,2	3,81	0,36	76	22	18,45	Супесь
	ВН 17-25	8,72	4,9	4,4	4,12	0,36	56	6	14,85	Супесь
BC 25-60	11,85	4,8	4,5	4,50	-	-	-	12,24	Супесь	
4	АО 0-6	4,25	4,6	3,9	6,58	0,55	178	62	14,63	Супесь
	ВН 6-17	2,87	4,2	3,8	3,60	0,32	72	52	17,19	Супесь
	BAN 17-25	3,04	4,1	4,1	4,15	0,39	42	65	13,35	Супесь
	BCh1 25-35	8,54	4,7	4,1	3,09	-	-	-	13,43	Супесь
	BC 35-65	9,60	5,2	4,5	3,11	-	-	-	15,24	Супесь
5	AY 0-13	1,44	4,0	3,6	3,55	0,14	48	276	20,94	Суглинок лег.
	Н 13-20	3,02	4,6	4,2	12,60	0,41	40	168	23,51	Суглинок лег.
	ВН 20-35	2,09	6,2	6,0	1,75	0,17	108	516	44,54	Суглинок тяж.
	Н 35-40	7,89	3,7	2,8	14,86	-	-	-	32,33	Суглинок ср.
	BC1 40-50	0,58	7,3	-*	1,32	-	-	-	21,87	Суглинок лег.
	BC2 50-70	0,18	6,8	-*	0,80	-	-	-	11,75	Супесь
6	AU 0-20	4,38	4,6	4,0	5,75	0,51	157	36	14,55	Супесь
	BAN 20-33	3,62	4,7	4,1	3,67	0,17	27	45	15,95	Супесь
	BCh 33-40	8,13	4,8	3,9	4,62	0,38	26	12	15,49	Супесь
	BC 40-50	10,66	4,4	3,9	5,45	-	-	-	15,45	Супесь

\* рН солевой вытяжки не определялся для нейтральных и щелочных проб

\* рН of the salt extract for neutral and alkaline samples was not determined

Содержание общего азота (0,02–0,76%) было больше в верхних горизонтах охристых почв (профили 1–4, 6), что может быть связано с аэрацией, которая создает благоприятные условия для аммонификации и нитрификации, т. е. способствует накоплению азота. В аллювиально-серогумусовой почве (профиль 5) азот накапливался в иллювиально-гумусовом горизонте. Пентаоксид фосфора ( $P_2O_5$ ) в аллювиально-серогумусовой (профиль 5) почве накапливался в иллювиально-гумусовом горизонте, представленном преимущественно тяжелыми суглинками. В охристых почвах аккумулятивной позиции происходило накопление  $P_2O_5$  в грубогумусовом горизонте (профиль 2), а в склоновой позиции (профили 3, 4, 6) происходило уменьшение значений вниз по профилю.

Большинство почв характеризуется низкой обеспеченностью подвижного фосфора (30–80 мкг/кг) [Умер, Ванькова, 2011]. Очень высокой обеспеченностью (>300 мкг/кг) обладают грубогумусовые горизонты охристых почв аккумулятивной позиции и темногумусовый горизонт аллювиально-серогумусовой почвы (743–1640 и 516 мкг/кг). Повышение значений подвижных форм калия вниз по профилю прослеживалось в охристой почве в аккумулятивной позиции и в аллювиально-серогумусовой почве (профили 2, 5), что может быть связано с преобладающим суглинистым гранулометрическим составом, который содержит глинистые частицы, способные фиксировать калий. Снижение значений прослеживалось в охристых почвах аккумулятивной и склоновой позиций (профили 1, 3, 4, 6), что может быть связано с наличием супеси по профилю. В целом обеспеченность в большинстве изученных горизонтов можно считать как низкую (60–80 мкг/кг) [Умер, Ванькова, 2011], и только некоторые горизонты, такие как иллювиально-

гумусовый, темногумусовый и грубогумусовый охристых почв, показывали повышенную (120–1 700 мкг/кг) обеспеченность оксидом калия при значениях 211, 157 и 151–191 мкг/кг соответственно.

Охристые почвы в склоновой позиции (профили 3, 4, 6) полностью классифицируются как супесчаные. В охристой (профили 1, 2) и аллювиально-серогумусовой (профиль 5) почвах с увеличением глубины наблюдалось облегчение механического состава, где нижние горизонты представлены супесью и легким суглинком. Преобладающей фракцией в исследуемых почвах являлись песок, а также мелкая и крупная пыль. Содержание ила в образцах было незначительное – 0,08–19,5%.

Метаболический коэффициент отражает активность почвенных микроорганизмов и их способность разлагать органическое вещество. Базальное дыхание, или скорость продуцирования углекислоты почвой, является одним из основных индикаторов состояния микробиоценозов почв. Максимальные значения наблюдаются в гумусовых горизонтах, тогда как наименьшие показатели характерны для охристых минеральных горизонтов. В охристых почвах аккумулятивной позиции показатель эмиссии углекислого газа варьируется – минимальные значения характерны для охристого горизонта, а максимальные – для иллювиально-гумусового горизонта (88,74 и 149,37 мкг  $CO_2-C$  г/сут) соответственно. В охристых почвах склоновой позиции отмечается схожая картина: в срединных горизонтах снижение показателей эмиссии (152,73–196,72 мкг  $CO_2-C$  г/сут), затем по мере углубления профиля небольшое увеличение (203,25–212,54 мкг  $CO_2-C$  г/сут), наблюдаемое в переходном горизонте, в котором происходит разложение органических частиц за счет активности почвенных организмов,

и самые высокие значения характерны для гумусовых горизонтов. В аллювиально-серогумусовой почве гумусовые горизонты демонстрируют высокие показатели эмиссии углерода (171,09–196,72 мкг CO<sub>2</sub>-C г/сут) благодаря высокому содержанию органического вещества, что способствует активной микробной деятельности.

На рисунке 3 приведены результаты биологических характеристик для исследуемых почв. Так, наибольшее значение qCO<sub>2</sub> прослеживалось в охристых почвах склоновой позиции. Высокие значения коэффициента говорят о низкой эффективности использования углерода, что может привести к стрессовым условиям для микроорганизмов, особенно на фоне повышенного содержания в почве тяжелых металлов, которые дополнительно ухудшают состояние микробного сообщества и снижают его биологическую активность.

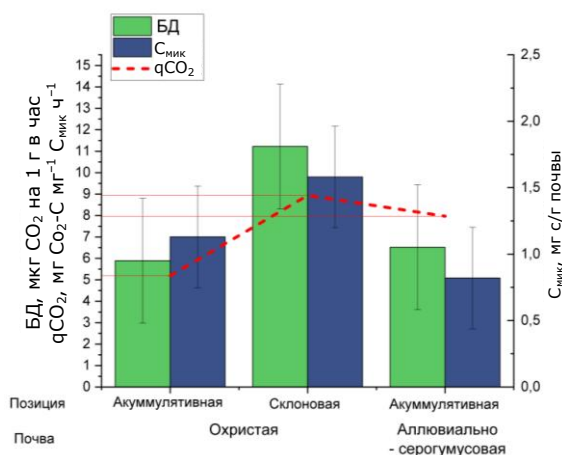


Рис. 3. Углерод микробной биомассы (C<sub>микр</sub>), базальное дыхание (БД) и метаболический коэффициент (qCO<sub>2</sub>) со стандартным отклонением (1 SD) в профиле почв (грубогумусовый горизонт 0–20 см) аккумулятивной и склоновой позиций охристой и аллювиально-серогумусовой почв

Fig. 3. Microbial biomass carbon (C<sub>mic</sub>), basal respiration (BR) and metabolic quotient (qCO<sub>2</sub>) with standard deviation (1 SD) in the soil profile (coarse humus horizon 0–20 cm) of the accumulative and slope positions of ocher and alluvial-gray humus soils

### Оценка содержания тяжелых металлов

Тяжелые металлы, такие как Sr, Pb, As, Zn, Ni, Co, Cr, V, активно участвуют в биохимических процессах и накапливаются в почве, особенно в дерновой подстилке и гумусовых слоях [Бокова, 2005; Дегтярева, 2003; Дзапаров, 2007]. В таблице 3 представлены результаты содержания тяжелых металлов в почвах на территории ДОЛ «Восход». Фоновые значения были взяты из работы по почвам юго-восточного района Камчатки [Захарихина, Литвиненко, 2019]. Превышение фоновых значений наблюдалось почти по всем металлам в горизонтах. Содержание Sr варьировало от 80 до 310 мг/кг; Pb – от 3 до 53 мг/кг; As – от 5 до 10 мг/кг, что превышает фон (3,31 мг/кг); Zn – от 18 до 305 мг/кг; Ni – от 4 до 65 мг/кг; Co – от 1 до 18 мг/кг; Cr – от 37 до 286 мг/кг, что превышает фон (19,85 мг/кг); V – от 16 до 224 мг/кг.

Превышение фона по мышьяку и хрому в 2–4,5 и в 2–14 раз соответственно фиксировали во всех образцах. В охристых почвах аккумулятивной позиции (профили 1, 2) значения свинца выше фоновых значений во всех горизонтах в 2–6 раз. Цинк содержится в иллювиально-гумусовом и грубогумусовом горизонтах больше в 2–4 раза от фона, а никель в 2,5–7 раз. По ванадию, стронцию и кобальту превышение незначительное. В охристых почвах склоновой позиции (профили 3, 4, 6) ванадия присутствует в два раза больше фона в нижних горизонтах. Значения свинца и цинка выше в 2–4,5 раза в верхних горизонтах. Кобальт, никель, стронций превышают незначительно. В аллювиально-серогумусовой почве (профиль 5) наблюдалось увеличение значений по свинцу в 3,5 раза и никелю в пять раз от фона в срединном горизонте. Содержание стронция, цинка, кобальта и ванадия превышало незначительно.

Таблица 3. Содержание тяжелых металлов в изучаемых почвах

Table 3. Content of heavy metals in the investigated soil samples

Горизонт, глубина, см	Sr (мг/кг)	Pb (мг/кг)	As (мг/кг)	Zn (мг/кг)	Ni (мг/кг)	Co (мг/кг)	Cr (мг/кг)	V (мг/кг)
Профиль 1								
АО (0-8)	163	20	7	32	16	7	68	104
ВН (8-11)	215	41	10	272	65	17	286	123
ВАНh (11-24)	199	13	7	19	10	2	41	22
ВАН (24-32)	186	15	6	64	36	18	88	111
ВН (32-37)	174	18	8	48	23	10	77	95
ВF (37-44)	225	20	7	40	13	9	52	53
ВАН (44-50)	234	14	7	29	14	10	50	44
Профиль 2								
АО (0-4)	232	52	10	140	22	8	57	66
ВНF (4-11)	207	18	5	38	7	6	43	33
АО (11-22)	214	53	10	89	16	3	53	48
ВНF2 (22-34)	244	20	8	21	10	1	48	27
АО (34-36)	187	24	9	54	13	5	51	47
BC (36-42)	185	18	6	32	15	10	57	67
Профиль 3								
АО (0-10)	213	28	9	305	12	13	49	76
ВАН (10-17)	310	4	7	70	6	2	44	84
ВCh (17-25)	147	13	8	57	6	5	77	220
BC 25-60)	80	10	8	31	7	12	74	217
Профиль 4								
АО (0-6)	230	13	7	132	10	14	48	100
ВН (6-17)	229	-	7	74	5	10	40	73
ВАН (17-25)	191	19	8	68	4	3	39	60
ВCh (25-35)	171	3	6	100	11	14	69	224
BC (35-65)	207	3	6	60	8	16	59	169
Профиль 5								
AY (0-13)	199	22	9	46	13	6	56	68
Н (13-20)	177	17	9	46	22	7	58	73
ВН (20-35)	159	20	8	46	22	8	70	103
Н (35-40)	103	40	14	29	14	9	56	51
BC1 (40-50)	172	29	7	75	40	13	111	65
BC2 (50-70)	215	12	5	18	8	9	37	16
Профиль 6								
AU (0-20)	253	4	6	68	14	10	54	118
ВАН (20-33)	207	8	7	66	11	8	45	69
ВCh (35-40)	204	8	7	63	10	10	64	199
BC (40-50)	230	6	6	66	7	17	59	168
Фоновые значения								
-	186,54	7,96	3,31	65,31	8,81	10,76	19,85	92,19

**Индекс суммарного загрязнения (Z<sub>c</sub>)**

По данным других исследователей [Авдощенко, Климова, 2020], в 2017–2018 гг. в г. Петропавловске-Камчатском был выявлен допустимый уровень загрязнения (Z<sub>c</sub> < 16) тяжелыми металлами. Данные по

индексу суммарного загрязнения на исследованной нами территории представлены на рисунке 4. Большинство исследованных нами проб почвы относятся к допустимому уровню загрязнения (<16), и только одна находится на уровне умеренно опасного (16–32).

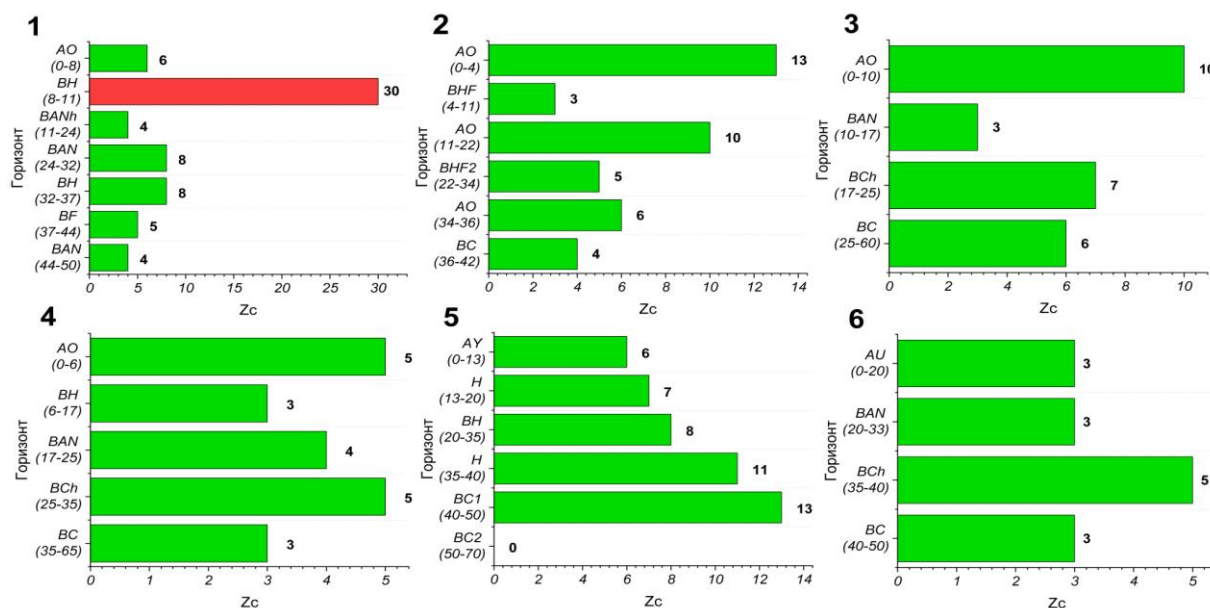


Рис. 4. Индекс суммарного загрязнения. Красным цветом выделен горизонт, относящийся к умеренно опасному уровню загрязнения (16–32), зеленым выделены горизонты с допустимым уровнем загрязнения (<16)

Fig. 4. Total pollution index. The horizon with a moderately hazardous pollution level (16–32) is highlighted in red; horizons with an acceptable pollution level (<16) are highlighted in green

### Коэффициент радиальной дифференциации ( $R$ )

По коэффициенту радиальной дифференциации Елизовского района имеется существенная нехватка данных. По Б.И. Слядневу и др. [Государственная геологическая..., 2006] радиальная дифференциация в вулканических почвах, в связи с их промывным режимом в условиях обилия атмосферных осадков, определяется общей тенденцией выноса подавляющего большинства химических элементов из почвенного слоя во всех типах ландшафтов и относительным обогащением почвенного горизонта А только Pb, As и др. Почвенный горизонт В обогащен Zn, V, Cr, Sr и др. относительно верхнего гумусового горизонта, из которого они интенсивно вымываются. Дифференцированно в различных типах ландшафтов ведут себя Ni и Co, которые преимущественно накапливаются в почвенном горизонте А во всех

типах горных ландшафтов и выносятся из этого горизонта в ландшафтах равнин и низменностей. При этом в почвах Восточной Камчатки подвижность химических элементов намного выше за счет более обильных атмосферных осадков, обуславливающих промывной режим. Также атмосферные осадки играют роль одного из геохимических барьеров [Глазовская, Богданова, 2011], т. к. происходит обогащение пеплом и снижение геохимического потенциала.

Данные по коэффициенту радиальной дифференциации представлены на рисунке 5. По значениям  $R$  наблюдалось накопление цинка (2,2–9,8) и свинца (2,8–6,3) в верхних горизонтах большинства охристых почв, в аллювиально-серогумусовой почве, наоборот, накопление происходило в нижнем горизонте (4,2 и 3,3). Никель накапливался в нижнем горизонте аллювиально-серогумусовой почвы (5), а в охристых почвах значение коэффициента в большинстве проб не превышало 2. Накопление

хрома было обнаружено только в одном профиле иллювиально-гумусового горизонта (5,7). Ванадий в аллювиально-серогумусовой почве накапливался по всему профилю. Высоких значений коэффициента радиальной дифференциации по мышьяку и кобальту не обнаружено.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования дополняют имеющиеся данные об экотоксикологическом состоянии почв Елизовского района Камчатского полуострова. Установлено, что охристые и серогумусовые почвы характеризуются низкой степенью гумификации почвенного органического вещества, о чем говорят сравнительно низкие значения метаболического коэффициента (5,19–8,94 мг CO<sub>2</sub>-C мг<sup>-1</sup>C<sub>мик</sub> ч<sup>-1</sup>). Подавление биологической активности в исследованных почвах может усугубляться также накоплением тяжелых металлов. Установле-

но, что охристые почвы отличаются аккумуляцией таких металлов, как As (превышение фона до 4,5 раза) и Cr (превышение фона до 14 раз) в верхней части почвенного профиля, а ниже по почвенному профилю концентрации потенциально токсичных элементов резко снижается и остается ниже регионального фона. Почвы более тяжелого гранулометрического состава (аллювиально-серогумусовые) особенны процессами миграции тяжелых металлов по почвенному профилю, в них происходит аккумуляция таких металлов, как Pb, As, Zn, Ni, Cr, V, в срединных почвенных горизонтах.

В целом изученная территория не отличается наличием опасного уровня загрязнения тяжелыми металлами, что подтверждается проведенными расчетами индекса суммарного загрязнения Z<sub>c</sub> (в большинстве случаев Z<sub>c</sub> < 16). Это может свидетельствовать о благоприятных экологических условиях и сохраняющейся стабильности почвенного покрова.

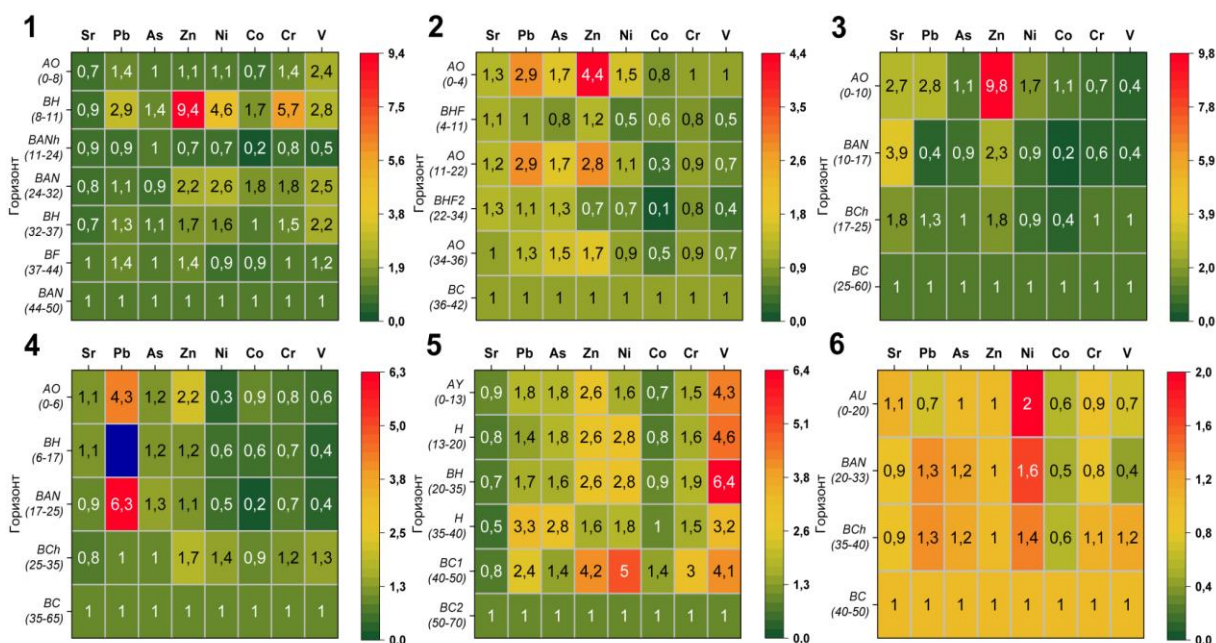


Рис. 5. Коэффициент радиальной дифференциации. Синим цветом обозначено отсутствие данных

Fig. 5. Radial differentiation coefficient. Blue-colored insert indicates missing data

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование проводилось в рамках темы НИР СПбГУ «От карбонового полигона к углеродному регулированию: потенциал и пути развития секвестрационной углеродной индустрии на территории Ленинградской области и Санкт-Петербурга» 123042000071-8 (GZ\_MDF\_2023-3, PURE ID 132271892).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

- Авдощенко В.Г., Климова А.В. 2020. Содержание тяжелых металлов в почвах Петропавловска-Камчатского (Камчатский край) в 2017–2018 гг. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. Вып. 52. С. 50–63.
- Бокова Т.И. 2005. Закономерности детоксикации антропогенных загрязнителей (тяжелых металлов) в системе почва – растение – животное – продукт питания человека. *Диссертация ... д-ра биол. наук*. Новосибирск. 345 с.
- Глазовская М.А., Богданова М.Д. 2011. Почвенные горизонты как геохимические барьеры. Национальный атлас почв Российской Федерации. С. 248–249.
- ГОСТ Р 26213-91. 1993. Почвы. Методы определения органического вещества.
- ГОСТ Р 54650-2011. 2013. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО.
- ГОСТ Р 58596-2019. 2019. Почвы. Методы определения общего азота. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Москва: Стандартинформ.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. 2006. Серия Корякско-Камчатская. Лист № 57 – Петропавловск-Камчатский. Объяснительная записка. Санкт-Петербург: Издательство СПб картфабрики ВСЕГЕИ. 376 с.
- Дегтярева Т.В. 2003. Геохимические особенности ландшафтов г. Ставрополя (на примере распределения тяжелых металлов в почве и растениях). *Диссертация ... канд. географ. наук*. Ставрополь. 182 с.
- Дзапаров В.Х. 2007. Исследование влияния тяжелых металлов на почву. *Интеллектуальные системы в производстве*. № 2. С. 183–187.
- Ермакова С.В. 2022. Содержание тяжелых металлов почв сельскохозяйственных угодий юго-восточной Камчатки на территории Елизовского района. *Национальная (всероссийская) научно-практическая конференция «Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промышленное и техническое использование»*. Петропавловск-Камчатский. С. 169–172.
- Захарихина Л.В., Литвиненко Ю.С. 2019. Вулканизм и геохимия почвенно-растительного покрова Камчатки. Сообщение 2. Специфика формирования элементного состава вулканических почв в холодных гумидных условиях. *Вулканология и сейсмология*. № 3. С. 25–33.
- Захарихина Л.В. 2009а. Особенности почвообразования в условиях активного вулканизма (на примере Камчатки). *Вестник Томского государственного университета. Биология*. № 3. С. 85–94.
- Захарихина Л.В. 2009б. Провинции почв Камчатки, различающиеся составом и возрастом вулканических пеплов, на которых они образованы. *Вестник*

- Томского государственного университета. Биология. № 2. С. 95–110.
- Иваненко Н.В. 2016. Анализ почвенно-земельных ресурсов Камчатского края – перспективы использования. *Успехи современного естествознания*. № 12. С. 85–89.
- Казаков Н.В. 2022. Особенности некоторых камчатских почв и необходимость их сохранения. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. Вып. 61. С. 82–92.
- Казаков Н.В., Дульченко Е.В. 2024. Грядово-бугристый рельеф на плато Уксичан срединного хребта Камчатки: роль мерзлоты и растительности. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. Вып. 70. С. 73–86.
- МУ 2.1.7.730-99. 1999. Гигиеническая оценка качества почв населенных мест. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (ГОСТ Р). Москва.
- Перельман А.И., Касимов Н.С. 1999. Геохимия ландшафта. Москва: Астрей. 764 с.
- Полевой определитель почв России. 2008. Москва: Почвенный институт имени В.В. Докучаева РАСХН. 182 с.
- Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв: методическое руководство. 2001. Под ред. Е.В. Шеина. Москва: Издательство МГУ. 200 с.
- Практикум по агрохимическому анализу почв. 2005. Учебное пособие. Под ред. К.Г. Крейера. Санкт-Петербург: Издательство СПбГУ. 87 с.
- Растворова О.Г., Андреев Д.П., Гагарина Э.И. и др. 1995. Химический анализ почв. Учебное пособие. Санкт-Петербург: Издательство СПбГУ. 264 с.
- СанПиН 1.2.3685-21. 2021. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Санитарные правила и нормы Российской Федерации. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (ГОСТ Р). Москва.
- Смелкова А.Ю. 2007. Роль вулканических процессов в формировании ландшафтов Камчатки – Глава 1. Физико-географические особенности Камчатки 2007. URL: <https://www.kamchatsky-krai.ru/geography/volcanoes/smelkova-volcano/2.htm> (дата обращения: 18.05.2025).
- СП 502.1325800. 2021. Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/608706538> (дата обращения: 09.09.2025).
- Умер М.И., Ванькова А.А. 2011. Микробиологическая активность на поверхности и внутри почвенных агрегатов. *Известия ТСХА*. № 6. С. 78–83.
- Федоров А.С., Суханов П.А., Касаткина Г.А. и др. 2014. О новой классификации почв России (2004). *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*. № 1. С. 95–113.
- Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И. и др. 2004. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена. 342 с.
- Щитинский В.А., Путерман Л.Н., Гришечкина И.Е. и др. 2012. Елизовский муниципальный район. Схема территориального планирования. Часть 1. URL: [http://admelizovo.ru/media/project\\_mo\\_189/45/48/24/c6/40/a2/stp\\_chast1.pdf](http://admelizovo.ru/media/project_mo_189/45/48/24/c6/40/a2/stp_chast1.pdf) (дата обращения: 18.05.2025).
- Яськин М.П., Герасимов Н.Н. 2019. Юго-восточная Камчатка середины XX столетия (природа, люди, промыслы). Москва: Издательство Центра охраны дикой природы. 184 с.
- Anderson J.P.E., Domsch K.H. 1978. A physiological method for the quantitative

measurements of microbial biomass in soils. *Soil Biology and Biochemistry*. Vol. 10. P. 215–221.

### REFERENCES

- Avdoshchenko V.G., Klimova A.V. 2020. Content of heavy metals in the soil of Petropavlovsk-Kamchatsky (Kamchatka Krai) in 2017–2018. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (Bulletin of Kamchatka State Technical University)*. № 52. P. 50–63 (in Russian).
- Bokova T.I. 2005. Patterns of detoxification of anthropogenic pollutants (heavy metals) in the soil-plant-animal-human food product system. *Doctoral dissertation for biological sciences*. Novosibirsk. 345 p. (in Russian).
- Glazovskaya M.A., Bogdanova M.D. 2011. Soil horizons as geochemical barriers. National Soil Atlas of the Russian Federation. P. 248–249 (in Russian).
- GOST R 26213-91 (National standart). 1993. Soils. Methods for determining organic matter (in Russian).
- GOST R 54650-2011 (National standart). 2013. Soils. Determination of mobile phosphorus and potassium compounds by Kirsanov's method as modified by the Central Institute of atomic energy (in Russian).
- GOST R 58596-2019 (National standart). 2019. Soils. Methods for determining total nitrogen. Federal Agency for technical regulation and metrology. Moscow: Standardinform (in Russian).
- State geological map of the Russian Federation. 2006. Koryak-Kamchatka series. Sheet № 57 – Petropavlovsk-Kamchatsky. Explanatory note. St. Petersburg: Publishing House of the St. Petersburg map factory VSEGEI. 376 p. (in Russian).
- Degtyareva T.V. 2003. Geochemical features of Stavropol landscapes (based on the distribution of heavy metals in soil and plants). *Candidacy dissertation for geographical sciences*. Stavropol. 182 p. (in Russian).
- Dzaparov V.Kh. 2007. Study of the influence of heavy metals on soil. *Intellektual'nyye sistemy v proizvodstve (Intelligent Systems in Production)*. № 2. P. 183–187 (in Russian).
- Ermakova S.V. 2022. Heavy metal content in agricultural soils of southeastern Kamchatka in Yelizovsky District. *National (All-Russian) Scientific and Practical Conference “Natural Resources, Their Current State, Protection, Commercial and Technical Use”*. Petropavlovsk-Kamchatsky. P. 169–172 (in Russian).
- Zakharikhina L.V., Litvinenko Yu.S. 2019. Volcanism and geochemistry of soil and vegetation cover of Kamchatka. Report 2. Specific features of the formation of the elemental composition of volcanic soils in cold humid conditions. *Vulkanologiya i seismologiya (Journal of Volcanology and Seismology)*. № 3. P. 25–33 (in Russian).
- Zakharikhina L.V. 2009a. Peculiarities of soil formation under conditions of active volcanism (using Kamchatka as an example). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya (Tomsk State University Journal. Biology)*. № 3. P. 85–94 (in Russian).
- Zakharikhina L.V. 2009b. Soil provinces of Kamchatka, differing in the composition and age of the volcanic ashes on which they were formed. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya (Tomsk State University Journal. Biology)*. № 2. P. 95–110 (in Russian).
- Ivanenko N.V. 2016. The analysis of soil and land resources of Kamchatka Krai – the prospects of use. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya (Advances in Current Natural Sciences)*. № 12. P. 85–89.
- Kazakov N.V. Peculiarities of some Kamchatka soils and necessity of their preser-

- vation. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta (Bulletin of Kamchatka State Technical University)*. Iss. 61. P. 82–92 (in Russian).
- Kazakov N.V., Dulchenko E.V. 2024. Ridge-hummock relief on the Uksichan plateau of the Sredinny Range of Kamchatka: the role of permafrost and vegetation. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta (Bulletin of Kamchatka State Technical University)*. Iss. 70. P. 73–86 (in Russian).
- MU 2.1.7.730-99. 1999. Hygienic Assessment of Soil Quality in Populated Areas. Federal Agency for Technical Regulation and Metrology (GOST R). Moscow (in Russian).
- Perelman A.I., Kasimov N.S. 1999. Landscape geochemistry. Moscow: Astrea Publ. 764 p. (in Russian).
- Field guide to soils of Russia. 2008. Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Institute, Russian Academy of Agricultural Sciences. 182 p. (in Russian).
- Field and laboratory methods for studying the physical properties and regimes of soils: a methodological guide. 2001. Ed.: Shein E.V. Moscow: Moscow State University Publ. 200 p. (in Russian).
- Workshop on agrochemical analysis of soils. 2005. Study guide. Ed. K.G. Kreyer. St. Petersburg: St. Petersburg State University Publ. 87 p. (in Russian).
- Rastvorova O.G., Andreev D.P., Gagarina E.I. et al. 1995. Chemical analysis of soils. Study guide. St. Petersburg: St. Petersburg State University Publ. 264 p. (in Russian).
- SanPiN 1.2.3685-21. 2021. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans. Sanitary rules and norms of Russian Federation. Federal Agency for Technical Regulation and Metrology (GOST R). Moscow (in Russian).
- Smelkova A.Yu. 2007. The role of volcanic processes in the formation of Kamchatka landscapes – Chapter 1. Physical and geographical features of Kamchatka 2007. URL: <https://www.kamchatsky-krai.ru/geography/volcanoes/smelkova-volcano/2.htm> (accessed: 18.05.2025) (in Russian).
- SP 502.1325800. 2021. Engineering and environmental surveys for construction. General rules for the performance of work. URL: <https://docs.cntd.ru/document/608706538> (accessed: 09.09.2025) (in Russian).
- Umer M.I., Vankova A.A. 2011. Microbiological activity on the surface and inside soil aggregates. *Izvestiya TSKHA (Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy)*. № 6. P. 78–83 (in Russian).
- Fedorov A.S., Sukhanov P.A., Kasatkina G.A. et al. 2014. On the new classification of soils in Russia (2004). *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle (Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences)*. № 1. P. 95–113 (in Russian).
- Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I. et al. 2004. Classification and diagnostics of soils in Russia. Smolensk: Oikumena Publ. 342 p. (in Russian).
- Shchitinsky V.A., Puterman L.N., Grischechkina I.E. et al. 2012. Yelizovsky municipal district. Territorial planning scheme. Part 1. URL: [http://admelizovo.ru/media/project\\_mo\\_189/45/48/24/c6/40/a2/stp\\_chast1.pdf](http://admelizovo.ru/media/project_mo_189/45/48/24/c6/40/a2/stp_chast1.pdf) (accessed: 18.05.2025) (in Russian).
- Yas'kin M.P., Gerasimov N.N. 2019. South-eastern Kamchatka in the mid-20th century (nature, people, industries). Moscow: Publishing House of the Wildlife Conservation Center. 184 p. (in Russian).
- Anderson J.P.E., Domsch K.H. 1978. A physiological method for the quantitative measurements of microbial biomass in soils. *Soil Biology and Biochemistry*. Vol. 10. P. 215–221.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**  
**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Швецова Анна Александровна** – Санкт-Петербургский государственный университет; 199178, Россия, Санкт-Петербург; магистр кафедры прикладной экологии; st133942@student.spbu.ru. SPIN-код: 8355-6913, Author ID: 1329777; Scopus ID: 60526442100; Researcher ID: PJC-2386-2026; ORCID: 0009-0003-8122-3635.

**Shvetsova Anna Alexandrovna** – Saint Petersburg State University; 199178, Russia, Saint Petersburg; Master's Student of Applied Ecology Chair; st133942@student.spbu.ru. SPIN-код: 8355-6913, Author ID: 1329777; Scopus ID: 60526442100; Researcher ID: PJC-2386-2026; ORCID: 0009-0003-8122-3635.

**Пак Анастасия Леонидовна** – Санкт-Петербургский государственный университет; 199178, Россия, Санкт-Петербург; студент-бакалавр биологического факультета; st091667@student.spbu.ru.

**Pak Anastasia Leonidovna** – Saint Petersburg State University; 199178, Russia, Saint Petersburg; Bachelor's Student, Faculty of Biology; st091667@student.spbu.ru.

**Чебыкина Екатерина Юрьевна** – Санкт-Петербургский государственный университет; 199178, Россия, Санкт-Петербург; кандидат биологических наук, доцент кафедры прикладной экологии; e.chebykina@spbu.ru. SPIN-код: 4242-2483, Author ID: 725297; Scopus ID: 52163901800; Researcher ID: O-8872-2014; ORCID: 0000-0002-2449-2180.

**Chebykina Ekaterina Yuryevna** – Saint Petersburg State University; 199178, Russia, Saint Petersburg; Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of Applied Ecology Chair; e.chebykina@spbu.ru. SPIN-code: 4242-2483, Author ID: 725297; Scopus ID: 52163901800; Researcher ID: O-8872-2014; ORCID: 0000-0002-2449-2180.

**Динкелакер Наталья Владимировна** – Университет ИТМО; 197101, Россия, Санкт-Петербург; преподаватель; nvdinkelaker@mail.ru. SPIN-код: 3350-7203, Author ID: 87632; Scopus ID: 57201094299; ORCID: 0000-0002-1821-0044.

**Dinkelaker Natalia Vladimirovna** – ITMO University; 197101, Russia, St. Petersburg; Lecturer; nvdinkelaker@mail.ru. SPIN-code: 3350-7203, Author ID: 87632; Scopus ID: 57201094299; ORCID: 0000-0002-1821-0044.

Статья поступила в редакцию 30.09.2025; одобрена после рецензирования 12.11.2025; статья принята к публикации 15.05.2026.

The article was submitted 30.09.2025; approved after reviewing 12.11.2025; accepted for publication 15.05.2026.

Для цитирования: Швецова А.А., Пак А.Л., Чебыкина Е.Ю., Динкелакер Н.В. 2026. Эколого-токсикологическая оценка почв подножья Микижинского мыса Елизовского района полуострова Камчатка. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. Вып. 76. С. 111–127. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2026-76-111-127>.

For citation: Shvetsova A.A., Pak A.L., Chebykina E.Yu., Dinkelaker N.V. 2026. Ecological and toxicological assessment of soils in proximity of Mikizhinsky Cape in Elizovsky District, Kamchatka. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta (Bulletin of Kamchatka State Technical University)*. Iss. 76. P. 111–127 (in Russian). <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2026-76-111-127>.

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, (4152) 300-933  
E-mail: kamchatgtu@kamchatgtu.ru  
www.kamchatgtu.ru

Дата выхода в свет 30.06.2026 г.  
Формат 60\*84/8. Печать цифровая. Гарнитура РТ Astra Serif  
Авт. л. 9,52. Уч.-изд. л. 10,34. Усл. печ. л. 15,34  
Тираж 500 экз. Заказ № 216626

Цена свободная

Отпечатано в типографии «Строки» (ИП Волков А.Е.)  
394086, г. Воронеж, ул. Любы Шевцовой, д. 34

ISSN 2079-0333



9 772079 033418 >